



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 4(82)

•• 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

№ 4 (82) 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
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пшінько О. М., доктор технічних наук
Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук
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); Вакулєнко І. О., ДНУЗТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський державний 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); Кузнецов 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); Сладковські 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 30.08.2019 р., протокол № 1

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

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 4 (82) 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

Днепро

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); Богдывичус М., Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса (Литва); Бондар Б. Е., ДНУЖТ (Украина); Бондаренко И. А., ДНУЖТ (Украина); Вакуленко И. А., ДНУЖТ (Украина); Воронин С. В., УкрГУЖТ (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 экономики (Польша); Тютькин А. Л., ДНУЖТ (Украина); Шинкаренко В. И., ДНУЖТ (Украина)

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПП 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 30.08.2019 г., протокол № 1

Издатель

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

Адрес
учредителя

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

Издание публикуется с 1936 г.:

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

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACIONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 4 (82) 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., Szkoła Główna 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); Śladkowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (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 r. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 30.08.2019, Protocol no. 1
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»

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 504.5

M. M. BILIAIEV^{1*}, T. I. RUSAKOVA^{2*}, I. V. KALASHNIKOV^{3*}, V. V. HILOV^{4*},
E. Y. GUNKO^{5*}

^{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

^{3*}Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway», Kotliar St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{4*}Dep. «Ecology and Environmental Protection», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskogo str., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756 – 33-71 e-mail hilyov.v@gmail.com, ORCID 0000-0002-3014-5820

^{5*}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 0000-0001-9257-763X

NUMERICAL MODELING OF AIR POLLUTION FROM DUMPS

Purpose. Rock dumps are long-term sources of air pollution. A significant amount of harmful substances enters the atmosphere. Particularly intense is the pollution of atmospheric air due to dusting dumps. An important task is the development of methods for predicting the dynamics of atmospheric air pollution during the emission of harmful impurities from dumps. When developing methods for predicting the dynamics of air pollution from dumps. It is very important to create a universal model that would allow on a single computing platform to calculate the process of atmospheric air pollution for various impurities that are released from dumps. Another important problem is the choice of the place for optimal placement of future dumps in order to minimize their negative impact on the environment. **Methodology.** Numerical modeling of the formation of atmospheric pollution zones near rock dumps is based on the application of the equation of turbulent dispersion of an impurity in the atmosphere. To solve the problem of choosing the rational location of the dumps, the conjugate equation is used. Numerical integration is carried out using an implicit difference scheme. **Findings.** Numerical models are developed. The first numerical model allows one to evaluate the effect of rock dumps on air pollution. The second numerical model allows, on the basis of a one-time calculation, to determine the rational location of the future dump from the point of view of its minimal impact on air pollution. **Originality.** Two numerical models are proposed that are based on the application of the turbulent diffusion equation and the conjugate equation. These models make it possible to quickly determine the effect of rock dumps on air pollution. The models take into account the convective transport of the pollutant, atmospheric turbulent diffusion, the intensity of the emission of impurities from the dump. **Practical value.** The developed numerical models are implemented in the form of program codes. These program codes can be used when performing serial calculations on computers of low and medium power, i.e. computer technology, which is available to organizations involved in environmental issues in technologically saturated regions. When carrying out calculations based on the constructed numerical models, typical initial data are used regarding the intensity of the emission of impurities from dumps, weather conditions characteristic of a specific region of the country.

Key words: air pollution, rock dumps, mathematical modeling, numerical models

Introduction

It is known that the wide extraction of hard coal around the world started in the beginning of the XIX century, which is connected with the needs of economic development [2, 10]. The coal is obtained in various ways: in quarries and in mines. A characteristic feature of the development of both coal deposits and other minerals is the removal of large rock masses, the annual volumes of which are several times higher than the volumes of coal produced. These rocks also form numerous dumps represented by different species of rocks, which are heterogeneous in the granulometric composition. Depending on the technology of heaping, dumps of the following types are formed: conical (waste pits), spinal and flat. The areas of influence of the dumps exceed the area of the dumps several times. Landfills and waste heaps occupy about 165 thousand hectares, which is 2.5 % of the territory of Ukraine.

The harmful effect of rock dumps of coal mines on the environment has been investigated by many authors. Dumps of coal mines burn, dust, erode and are radioactive. As a result of physical and chemical weathering, the rock collapses, turns into dust, and together with combustible gases and a combustion site is one of the main sources of air pollution and deterioration of the sanitary condition of cities and working settlements of coal mines. For waste heaps, spontaneous combustion processes are typical in which up to 70 thousand tons of harmful substances per year enter the atmosphere: carbon monoxide, carbon dioxide, sulfur dioxide, sulfuric anhydride, hydrogen sulphide, carbon disulfide, carbon monoxide, nitrogen oxides, sulfuric acid, ammonia, cyanides, thiocyanates and others. Much attention is paid to the burning coal dumps in the whole world. Various geophysical methods and methods of GIS are used to find centers of ignition. Gases entering the atmosphere from the dumps change the composition of atmospheric air, which significantly affects the soil and vegetation cover, the animal world, the productivity of land in adjacent areas to the dumps. At burning of 1 kg of a rock there is a pollution of atmospheric air in volume of 6.7-8.7 million m³. An assessment of the effect of dumps on the envi-

ronment in the study of physical and mechanical properties of rocks was carried out.

There are neighboring villages in the zone of the dumps influence, in this connection an active issue is the assessment of the harmful impact of dumps on the environment and, first of all, on the level of air pollution. For this evaluation, the OND-86 model is used, which completely does not allow taking into account the parameters of the stability of the atmosphere, the change in the value of wind speed to the formation of pollution zones. In the world practice, more universal mathematical models based on solving the equations of convective-diffusion dispersion of an impurity in atmospheric air are used to solve problems of assessing the influence of dumps on atmospheric air pollution.

At present, the regularities of the effect of dumps from coal mines on the environment have been clarified both during their operation and after the elimination of mines. Methodological approaches to the comprehensive environmental assessment of the impact of coal mine dumps on the environment have been improved. It was shown that an effective approach is based on adequate models of wind flow around dumps and convective-diffusion transfer of dust-gas impurities in the area of the dumps.

The main source of air pollution of adjacent areas to the dumps is their burning and dusting.

Around 60-75 % of conical and 17-37 % of flat dumps are subjected to spontaneous combustion, more than 500 thousand tons of gaseous substances are emitted from their surfaces annually. Namely, about 9.758 kg of CO, 154170 kg of CO₂, 1476 kg of SO₂, 339 kg of H₂S, 72 kg of NO+NO₂ enter the atmosphere per day from burning rock dumps of mines and concentrating factories of Donbas. Accumulation of these substances is the cause of environmental problems such as «destruction of the ozone layer» and «greenhouse effect». In addition, more than 400 tons of rocks that contain toxic elements (Hg, Pb, As, Se, Cd, Ni, Mo, Zn, Mn, V, Be, etc.) are blown into each of the adjacent territories. A burning rock dump has a sanitary protection zone of 500 m, a non-combustible zone –300 m, a separation of harmful substances and combustion products – up to 3 km. From this it can be concluded that living in the territories located in the vicinity of waste tanks is dangerous for life and health.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

It is known that conducting experiments to investigate the formation of contamination zones is a fairly time-consuming process, Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling is performed with the help of expensive commercial packages ISC3, Aermod, Fluent, CFX, etc [3, 6–9]. Many numerical calculations are performed on the basis of the Lagrange and Gauss models and their various modifications [9, 11].

The aim of this work is the development of a numerical model for assessing the impact of dumps on air pollution in nearby settlements and the possible location of the dump so that its negative impact is minimal on the areas under consideration. The proposed model can be used to predict air pollution in the event of a possible ignition of the waste water when a significant amount of harmful substances enters the atmosphere.

Purpose

The aim of the work is to develop computing numerical models to assess dumps influence on air pollution and to solve the problem of choosing of rational dump location.

Methodology

In this paper, the solution of two problems is considered related to the simulation of atmospheric air pollution from dumps.

Direct problem. A direct problem is to simulate atmospheric air pollution from the dump at a known value of its location coordinates. It can be project coordinates, that is the location where the dump is supposed to be located, or the coordinates of an already existing dump. To simulate the spread of gaseous emissions from dumps, the mass transfer equation (1) is used. In many works the rock dump is considered as a point-like object of pollution, in this work the blade is modeled by a set of point sources specified by the Dirac function, so it is reduced to an area source.

The meteorological situation parameters specific for the particular region where the dumps are located are determined based on the processing of observational data or based on the application of meteorological forecast data [1–4, 6, 12]

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \end{aligned} \quad (1)$$

where C is the concentration of the pollutant (dust or gaseous impurity) (mg/m^3); u, v – averaged values of the components of the velocity vector of the air flow (m/s); σ – coefficient that takes into account the rate of settling of the impurity and interaction with the earth's surface ($1/\text{s}$); $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – the coefficients of turbulent diffusion (m^2/s^2); x_i, y_i – coordinates of point sources of pollutant receipt (m); Q_i – the averaged value of the intensity of the impurity from the dump at the location of the point source (mg/s); $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)$ – Dirac delta function, which simulates the flow of pollutant from an area source.

The coefficient σ , according to Marchuk, can be represented in the form $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, where σ_1 is the coefficient taking into account the chemical transformation of the impurity in the atmosphere, $\sigma_2 = \omega_g/H$ is a coefficient taking into account the ratio of gravitational settling velocity of the pollutant (dust) ω_g , m/s to the averaging height $H = 600 \div 800$ m, $\sigma_3 = \mu_z/H$ is the coefficient taking into account the turbulent interaction of the pollutant and underlying surface.

The intensity of admixture intake from dumps can be estimated on the basis of experimental data or developed methods [4]. For example, the intensity of dust emission (tons/day) from inactive dumps can be estimated on the basis of empirical dependence:

$$Q = 2 \cdot 10^{-5} \cdot S, \quad (2)$$

where S is the surface area of the dump (m^2).

Calculation of emissions (tons/day) from dumps not operating for less than three years is calculated using the formula:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$P_p = f \cdot P, \quad (3)$$

where P_p – the amount of polluting gases released from the dumps after the operation is finished (tons/day); P – amount of polluting gases released from the dumps during operation (tons/day) (4); f – coefficient, depending on the time during which the dump does not work.

After 1 year $f = 0,5$; after 2 years $f = 0,3$; after 3 years $f = 0,1$ (then the allocation becomes insignificant).

Calculation of gases emissions (tons/day) from existing burning slagheap and spinal heap are calculated according to the formula:

$$P = 0.001 \cdot m \cdot H \cdot D, \quad (4)$$

where m is the coefficient depending on the quality of coal (Table 1.), H – height of dump (m); D – the amount of rock that is given to the dump (tons/(m·day)).

Table 1

The values of the coefficient m

Contaminant	Donets basin	Lviv-Volyn basin
Carbon monoxide, CO	0,2	2,0
Carbon dioxide, CO_2	2,5	9,3
Sulfur dioxide, SO_2	0,02	0,5
Hydrogen sulfide, H_2S	0,01	0,03
Nitrogen oxides, $NO+NO_2$	0,002	0,006

Calculation of emissions (tons/day) for gases from burning flat dumps is calculated using the formula:

$$P = 0,001 \cdot q \cdot (0,036 \cdot S + 0,052 \cdot \sqrt{S} \cdot x \cdot H), \quad (5)$$

where q – specific gas emission (kg/(m² day)); for CO , $q = 7,6$; for CO_2 , $q = 138$; for SO_2 , $q = 1,7$; for H_2S , $q = 0,5$; for $NO + NO_2$, $q = 0,12$; S – the area of the base of the flat blade (m²); H – is the average height of the dump (m).

For the numerical solution of equation (1), an alternating-triangular implicit difference splitting scheme is used [1, 2, 6]. Consider the principle of constructing of this scheme.

Convective derivatives can be represented as:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

where

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2}, v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

To approximate convective derivatives, we use the expressions:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

The second derivatives are approximated by the following expressions:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \tilde{\mu}_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} =$$

$$= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} =$$

$$= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \tilde{\mu}_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} =$$

$$= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} =$$

$$= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

With these notations taken into account, the difference analog of the impurity transport equation (1) has the form:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ \cdot C^{n+1} + L_x^- \cdot C^{n+1} + \\ & + L_y^+ \cdot C^{n+1} + L_y^- \cdot C^{n+1} + \sigma \cdot C_{ij}^{n+1} = \\ & = (M_{xx}^+ \cdot C^{n+1} + M_{xx}^- \cdot C^{n+1} + \\ & + M_{yy}^+ \cdot C^{n+1} + M_{yy}^- \cdot C^{n+1}). \quad (6) \end{aligned}$$

Integration over a time interval splits equation (6) as follows:

- at the first time step $k = n + 1/4$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ \cdot C^k + L_x^- \cdot C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ \cdot C^k + M_{xx}^- \cdot C^k + M_{yy}^+ \cdot C^k + M_{yy}^- \cdot C^k); \quad (7) \end{aligned}$$

- at the second time step $k = n + 1/2$; $c = n + 1/4$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ \cdot C^k + L_x^- \cdot C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} (M_{xx}^- \cdot C^k + M_{xx}^+ \cdot C^c + M_{yy}^- \cdot C^k + M_{yy}^+ \cdot C^c); \quad (8) \end{aligned}$$

- at the third time step $k = n + 3/4$; $c = n + 1/2$ the formula (7) is used, in the fourth time step $k = n + 1$; $c = n + 3/4$ the formula (8) is used, in the fifth step the formula:

$$\frac{C_{i,j}^{5n+1} - C_{i,j}^{5n}}{\Delta t} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i(t^{n+1/2})}{\Delta x \Delta y} \cdot \delta_i. \quad (9)$$

A feature of this difference scheme is that an unknown value of the impurity concentration at each step of the splitting is found by the explicit scheme of the running count. Based on the difference equations, the «FORW-2D» code was developed.

Direct problem. Under this task, the situation is considered when it is necessary to find the location of the dump so that its negative impact on the objects under consideration is minimal. Namely, the concentration of the pollutant coming from the dump at the locality point of the settlement should not exceed a certain predetermined value $C(x, y) \leq C_n$, where C_n – MAC for populated areas.

To solve this problem, we can use equation (1) and sequentially choose different coordinates, different positions of the dump, by finding the solution of the problem by the search method. However, this process requires lots of calculations, since it is necessary to solve equation (1) many times to determine the pollutant concentration field in the settlement for different variants of the dump placement. More effective is the approach proposed by academician Marchuk, which is based on the solution of the conjugate equation (10) [3]

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial u C^*}{\partial x} - \frac{\partial v C^*}{\partial y} + \sigma C^* =, \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y}) + p \quad (10) \end{aligned}$$

where C^* is the function conjugated with a function C (mg/m^3), p is a certain function.

The boundary conditions for the conjugate problem have the form:

- $C^* = C_T^*$ – concentration of pollutant in ambient air at $t = T(s)$;

- $C^* = 0$ – at the boundaries of the calculated area.

The form of the function p can be extremely diverse, for example [3]:

$$p(x, y, t) = \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(t - t_i) \cdot C_T^*, \quad (11)$$

If a solution of the conjugated equation (10) is found, then it is necessary to find the value of the functional of the following form [3]:

$$I = Q \int_0^T C^*(x_0, y_0, t) dt \cdot \ddot{e} \quad (12)$$

Having constructed the isolines of this functional, the solution of the problem is sought from the condition [3]:

$$I(x_0, y_0, t) < \varphi, \quad (13)$$

where φ is maximum permissible value of potential I .

To solve the conjugated problem (10), new variables are introduced:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$u' = -u, v' = -v, t' = T - t.$$

The solution of the conjugated problem starts from the moment of time $t = T$, the calculation proceeds in the opposite direction of time. To solve equation (10), we use the alternate-triangular implicit difference scheme considered above, that is, an unknown value C^* is found by an explicit scheme of the running account. Based on this algorithm, the code «BACK-2D» was developed. This code is aimed to solve the problem of justifying the location of the dump.

Findings

The developed codes were used to solve two problems. The first problem is the calculation of the atmospheric air pollution zone with carbon monoxide using the proposed numerical model. The source of pollution are the dumps of the West-Donbas mine, the characteristic dimensions of the occupied territory are 860 m by 415 m according to the map. With the possible spontaneous combustion of these dumps, more than 10 tons/day of carbon monoxide can enter the atmosphere. The West-Donbas mine is a coal mining enterprise in the town of Ternivka, Dnipropetrovsk region (Ukraine), commissioned since 1979, is included in the PAO «Ternove» mine management of «DTEK Pavlohradvuhillya» (DTEK) from 2013, the largest mine in the Western Donbass. The calculation was carried out with the following parameters: the dimensions of the computed area were 4 km per 2 km, the wind velocity was $U = 6$ m/s with the south-west direction (Fig. 1), $C_{\max} = 18.381$ mg/m³ with steady flow regime.



Fig. 1. Percentage distribution of carbon monoxide concentration in the contaminated zone

The concentration value is represented as a percentage of its maximum value at the calculated time. Calculations showed that the maximum value of the concentration $C_{\max} = 18.381$ mg/m³ can exceed maximum allowable concentration (maximum one-time) $MAC_{m.t.} = 5$ mg/m³, but the distribution of concentration decreases from the center of the pollutant supply source (mine dumps) to the periphery. The percentage distribution of the concentration is shown in Figure 1, there are in the pollution zone: dumps – 96-76 %; the mine and its territory – 76-58 %; Molodizhna Str., Ivan Franko Str., Maiakovskoho Str. – 56-44 %; Lermontova Str., Dniprovs'ka Str. – 42-30 %; Zhovtneva Str., Spas'ka Str., Michurina Str. – 26-10 %. On the territory that limits the calculated zone of pollution, and outside of it the concentration of carbon monoxide is 5-10 % or less. In Figure 1, a general zone of contamination is shown in the circle, which can occur when the meteorological parameters change, namely the direction of the velocity.

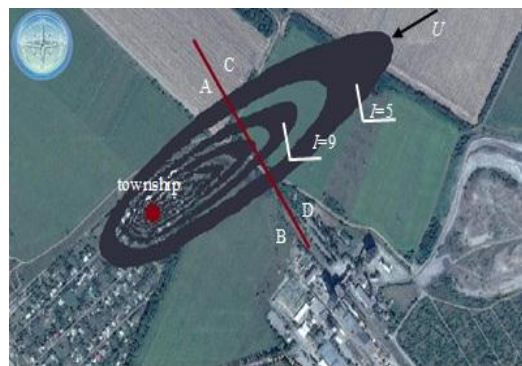


Fig. 2. Isolines of the functional I , which justify the choice of possible placement of the dump

The presentation of modeling results by imposition of contamination zones on a map of the territory, that is near to the source of pollution allows us to determine quickly the boundaries of zones of technogenic pollution and their variation under different meteorological conditions and different intensities of the pollutant.

The second problem is to select the location of the dump based on the solution of the conjugated equation. To illustrate the practical application of this approach, Figure 2 shows the isolines of the functional (12), determined after solving the

conjugated equation (10), which allow to determine the possible location of the dump, so that the negative impact on the village was minimal.

The isoline $I=5$ shows that if the dump is placed along this line, then in the village the concentration of CO in the air will be 5 mg/m^3 . If the dump is placed on the line $I=9$, this means that the CO concentration in the air is 9 mg/m^3 , it will exceed *MACm.t.* So, having made only one calculation based on the conjugate equation, it is possible to obtain an area where it is recommended to have a dump to minimize its influence on the level of air pollution in the village.

From the mathematical point of view, the influence of the dump on the air pollution in the village will be the same for any of its location along the line $I = \text{const}$ ($I=5$). However, from a practical point of view, it is necessary to divide the obtained picture of the isolines distribution of the functional I into two parts Figure 3. The section A-B should be excluded from consideration, because if the dump is located on this site, when the wind direction in the village changes, intensive air pollution will occur, so it makes sense to put a dump in the C-D section. So, a computational experiment carried out to determine the functional lines, taking into account the practically possible location of the dump, allows us to refine the coordinates of the dump by solving the direct problem using equation (1).

Originality and practical value

Two numerical models were developed to predict atmosphere pollution from dumps of breed. The first model is based on equation of pollutant convective – diffusive transfer. The second model is based on the equation of conjugate problem. Numerical integration of modeling equations is performed using implicit difference scheme of splitting. The developed models can be used for quick assessment of dumps influence on air pollution and to solve the problem of choosing of rational dump location.

Conclusions

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

1. A mathematical model is proposed for the «express» forecast of the level of air pollution in the impact zone of mine dumps, which is based on the numerical integration of the equation of convective-diffusion dispersion of an impurity in the atmosphere. For numerical integration of the modeling equation, an implicit difference splitting scheme is used, representing the balance of the impurity mass for each difference cell. The unknown value of the impurity concentration is determined by the running account method, which allows a simple software implementation of the difference relations.

The proposed model has a significant advantage over the currently used normative methodology of OND-86. The peculiarity of the model is the efficiency in obtaining forecast data. The model takes into account the main physical factors affecting the formation of contamination zones. This model is implemented in the form of the program code «FORW-2D».

2. A mathematical model has been developed for solving the problem of scientifically justified selection of the mine dump location with the condition of a minimum level of air pollution in ecologically significant areas (villages for workers, residential areas).

This model is based on solving the conjugate equation, which allows to determine the position of the dump based on a one-time calculation. This model is implemented in the form of the program code «BACK-2D».

3. The solution of the problem of assessing the impact of mine dumps on the level of atmospheric air pollution, as well as on justifying the location of the dump, requires 2 seconds of computer time. This is important for carrying out serial calculations in the centers for environmental protection.

4. The perspective of development in this direction is the working out of a 3D numerical model for predicting the formation of pollution zones near the dumps taking into account their geometric shape.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
2. Бересневич, П. В. Аэрология карьеров : справочник / П. В. Бересневич, В. А. Михайлов, С. С. Филатов. – Москва : Недра, 1991. – 280 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. 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.
5. Air pollution dispersion modeling in a polluted industrial area of complex terrain from Romania / G. Grigoras, V. Cuculeanu, G. Ene, G. Mocioasa, A. Deneanu // Romanian Reports in Physics. – 2012. – Vol. 64, No. 1. – P. 173–186.
6. Alvarez, J. T. Dust barriers in open pit blasts. Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations / J. T. Alvarez, I. D. Alvarez, S. T. Lougedo // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2008. – Vol. 116. – P. 86–93. doi:10.2495/AIR080101
7. Anand Kumar Varma, S. Mathematical modeling of air pollution in a thermal power project [Electronic resource] / S. Anand Kumar Varma. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/318284616_mathematical_modeling_of_air_pollution_in_a_thermal_power_project – Title from the screen. – Accessed : 25.04.2019.
8. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Jyotsna, K. A mathematical model to study the impact of mining activities and pollution on forest resources and wildlife population / K. Jyotsna, A. Tandon // Journal of Biological Systems. – 2017. – Vol. 25, No. 02. – P. 207–230. <http://doi.org/10.1142/S0218339017500115>
10. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Electronic resource] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Available at: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Title from the screen. – Accessed : 23.08.2019.
11. Škuta, R. Assessment of mining activities with respect to the environmental protection / R. Škuta, R. Kučerová, Z. Pavelek, V. Dirner // Acta Montanistica Slovaca. – 2017. – Vol. 22 (1). – P. 79–93.
12. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Electronic resource] / O. Zavila, P. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // The science for population protection. – 2015. – № 2. – Available at: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> – Title from the screen. – Accessed : 23.08.2019.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, Т. І. РУСАКОВА^{2*}, І. В. КАЛАШНІКОВ^{3*}, В. В. ГІЛЬОВ^{4*},
О. Ю. ГУНЬКО^{5*}

^{1*}Каф. «Гідраліка 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

^{3*}Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» акціонерного товариства «Укр-раїнська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{4*}Каф. «Екології та охорони навколишнього середовища», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 71, ел. пошта hilyov.v@gmail.com, ORCID 0000-0002-3014-5820

^{5*}Каф. «Гідраліка 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 0000-0001-9257-763X

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД ВІДВАЛІВ

Мета. Відвали породи є довгостроковими джерелами забруднення атмосферного повітря. В атмосферу надходить значна кількість шкідливих речовин. Особливо інтенсивно відбувається забруднення атмосферного повітря внаслідок цвітіння відвалів. Важливим завданням є розробка методів прогнозу динаміки забруднення атмосферного повітря при виділенні шкідливих домішок від відвалів. При розробці методів прогнозу динаміки забруднення повітряного середовища від відвалів. Дуже важливим є створення універсальної моделі, яка дозволяла б на єдиній обчислювальній платформі здійснювати розрахунок процесу забруднення атмосферного повітря для різних домішок, які виділяються від відвалів. Також важливою проблемою є вибір місця оптимального розміщення майбутніх відвалів, з метою мінімізації їх негативного впливу на навколишнє середовище. **Методика.** Чисельне моделювання формування зон забруднення атмосфери біля відвалів породи виконано на основі застосування рівняння турбулентного розсіювання домішки в атмосфері. Для вирішення задачі по вибору раціонального місця розташування відвалів використовується зв'язане рівняння. Чисельне інтегрування здійснюється за допомогою неявної різницевої схеми. **Результати.** Розроблено чисельні моделі. Перша чисельна модель дозволяє оцінити вплив відвалів породи на забруднення атмосферного повітря. Друга чисельна модель дозволяє на основі одноразового розрахунку визначити раціональне місце розташування майбутнього відвалу з точки зору його мінімального впливу на забруднення атмосферного повітря. **Наукова новизна.** Запропоновано дві чисельні моделі, які ґрунтуються на застосуванні рівняння турбулентної дифузії і зв'язаного рівняння. Дані моделі дозволяють оперативно визначити вплив відвалів породи на забруднення атмосферного повітря. Моделі враховують конвективний перенос забруднювача, атмосферну турбулентну дифузію, інтенсивність емісії домішки від відвалу. **Практична значимість.** Розроблені чисельні моделі імплементовані у вигляді програмних кодів. Дані програмні коди можуть бути використані, при проведенні серійних розрахунків на комп'ютерах малої і середньої потужності, тобто обчислювальної техніки, яка є в розпорядженні організацій, що займаються екологічними проблемами в техногенно насичених регіонах. При проведенні розрахунків на базі побудованих чисельних моделей використовуються типові вихідні дані щодо інтенсивності емісії домішок від відвалів, метеоумови, характерні для конкретного регіону країни.

Ключові слова: забруднення атмосфери, відвали породи, математичне моделювання, чисельні моделі

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, Т. И. РУСАКОВА^{2*}, И. В. КАЛАШНИКОВ^{3*}, В. В. ГИЛЁВ^{4*},
Е. Ю. ГУНЬКО^{5*}

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

^{2*}Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, эл. почта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

^{3*}Харьковское отделение филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» акционерного общества «Українська залізниця», ул. Котляра, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{4*}Каф. «Экологии и охраны окружающей среды», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 33 71, эл. почта hilyov.v@gmail.com, ORCID 0000-0002-3014-5820

^{5*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9257-763X

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ОТ ОТВАЛОВ

Цель. Отвалы породы являются долгосрочными источниками загрязнения атмосферного воздуха. В атмосферу поступает значительное количество вредных веществ. Особо интенсивно происходит загрязнение атмосферного воздуха вследствие пыления отвалов. Важной задачей является разработка методов прогноза динамики загрязнения атмосферного воздуха при выделении вредных примесей от отвалов. При разработке методов прогноза динамики загрязнения воздушной среды от отвалов. Очень важным является создание универсальной модели, которая позволяла бы на единой вычислительной платформе осуществлять расчет процесса загрязнения атмосферного воздуха для различных примесей, которые выделяются от отвалов. Также важной проблемой является выбор места оптимального размещения будущих отвалов, с целью минимизации их отрицательного влияния на окружающую среду. **Методика.** Численное моделирование формирования зон загрязнения атмосферы возле отвалов породы выполнено на основе применения уравнения турбулентного рассеивания примеси в атмосфере. Для решения задачи по выбору рационального места расположения отвалов используется сопряженное уравнение. Численное интегрирование осуществляется с помощью неявной разностной схемы. **Результаты.** Разработаны численные модели. Первая численная модель позволяет оценить влияние отвалов породы на загрязнение атмосферного воздуха. Вторая численная модель позволяет на основе одноразового расчета определить рациональное место расположения будущего отвала с точки зрения его минимального влияния на загрязнение атмосферного воздуха. **Научная новизна.** Предложены две численные модели, которые основываются на применении уравнения турбулентной диффузии и сопряженного уравнения. Данные модели позволяют оперативно определить влияние отвалов породы на загрязнение атмосферного воздуха. Модели учитывают конвективный перенос загрязнителя, атмосферную турбулентную диффузию, интенсивность эмиссии примеси от отвала. **Практическая значимость.** Разработанные численные модели имплементированы в виде программных кодов. Данные программные коды могут быть использованы, при проведении серийных расчетов на компьютерах малой и средней мощности, т.е. вычислительной технике, которая имеется в распоряжении организаций, занимающихся экологическими проблемами в техногенно насыщенных регионах. При проведении расчетов на базе построенных численных моделей используются типовые исходные данные относительно интенсивности эмиссии примесей от отвалов, метеоусловия, характерные для конкретного региона страны.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, отвалы породы, математическое моделирование, численные модели

REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Beresnevich, P. V., Mikhaylov, V. A., & Filatov, S. S. (1991). *Aerologiya karerov: spravochnik*. Moscow: Nedra. (in Russian)
3. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. Grigoras G., Cuculeanu V., Ene G., Mocioaca G., & Deneanu A. (2012). Air pollution dispersion modeling in a polluted industrial area of complex terrain from. *Romanian Reports in Physics*, 64(1), 173-186. (in English)
6. Alvarez, J. T., Alvarez, I. D., & Lougedo, S. T. (2008). Dust Barriers In Open Pit Blasts. Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 116, 86-93. doi: 10.2495/AIR080101 (in English)
7. Anand Kumar Varma, S. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/318284616_mathematical_modeling_of_air_pollution_in_a_thermal_power_project (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

9. Jyotsna, K., & A. Tandon (2017). A mathematical model to study the impact of mining activities and pollution on forest resources and wildlife population. *Journal of Biological Systems*, 25(2), 207-230. <http://doi.org/10.1142/S0218339017500115> (in English)
10. Government of Alberta. (2017). Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
11. Škuta, R., Kučerová, R., Pavelek Z., & Dirner V. (2017). Assessment of mining activities with respect to the environmental protection. *Acta Montanistica Slovaca*, 22(1), 79-93. (in English)
12. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for-emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> (in English)

Received: April 08, 2019

Accessed: August 12, 2019

UDC 519.872:[504.5:622.807]

V. V. BILIAIEVA^{1*}, P. S. KIRICHENKO^{2*}, O. V. BERLOV^{3*}, V. A. GABRINETS^{4*},
V. M. HORIACHKIN^{5*}

^{1*}Dep. «Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{2*}Dep. «Heat and Gas Supply, Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaliia Matusevycha St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{3*}Dep. «Life Safety», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756 34 57 e-mail berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{4*}Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

^{5*}Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

NUMERICAL HA COMPUTER COMPUTER MODELING OF AIR POLLUTION IN CASE OF DUST CLOUD MOVEMENT IN OPEN PIT MINE

Purpose. Explosions in open pits lead to the formation of dust clouds. These clouds lead to intense air pollution. An important task is the development of methods for predicting the dynamics of atmospheric air pollution during explosions in open pits. The purpose of this work is development of a numerical model to predict atmosphere pollution after explosion in open mine pit. The task is to develop a numerical model that would allow for the calculation to take into account the geometrical shape of the open pit mine, the parameters of the meteorological situation (wind speed, atmosphere), the shape of the dust cloud that is formed in the open pit mine at the site of the explosion.

Methodology. Mathematical modeling of dust cloud dispersion during an explosion in an open pit mine is based on the use of fundamental equations of aerodynamics and mass transfer. The airflow velocity field in the open pit mine is modeled using the Laplace equation for the velocity potential. The formation of the concentration field of dust is modeled on the basis of the equation of convective-diffusion dispersion of an impurity. For numerical integration of modeling equations, difference schemes are used. The Laplace equation for the velocity potential is numerically integrated using the Richardson method. For the numerical integration of the convective-diffusion dispersion equation for an impurity, an implicit difference splitting scheme is used. **Findings.** A CFD model has been developed that allows you to calculate the formation of pollution zones during the movement of a dust cloud in the open pit mine. A feature of the developed model is the speed of calculation. For practical use of the developed model, standard input information is required. **Originality.** In contrast to the existing models in Ukraine, the developed numerical model allows taking into account the geometrical shape of the open pit mine and the geometrical shape of the dust cloud when making predictive calculations to assess the level of air pollution caused by explosions in open pits. **Practical value.** The developed numerical model can be implemented on computers of low and medium power. For practical use of the numerical model, standard information on meteorological conditions in open pit mine is required. The numerical model can be used for environmental assessment of the effect of explosions in open pit mine on environmental pollution and work areas.

Key words: dust cloud; open pit mine; atmosphere pollution; numerical simulation

Introduction

Explosions in open pit mine yield in large amount of different pollutants emission into the atmosphere [3]. Assessment of risk as a result of air pollution in case of such emissions or others at the different enterprises is of great interest [1,2, 4, 5, 11, 14, 15]. Under the influence of atmospheric diffusion and wind flow, dust clouds are removed

from the pit. During explosions in the open pit mines, the territory adjacent to the open pit mine is contaminated. An important problem is prediction of air pollution after explosions in an open pit mine. In Ukraine, at present, the OND-86 method is used to predict the process of atmospheric pollution during explosions in open pit mine. However, this technique has a number of significant drawbacks. It does not take into account the geometric

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

shape of the open pit mine, the wind velocity profile, and atmospheric diffusion.

In this regard, the urgent task is to create efficient numerical models for analyzing the effects of emissions on atmospheric pollution. The use of numerical models, commercial codes like ANSYS® for the prediction of air pollution requires the use of powerful computers and much computer time [7, 8, 12, 13]. For practice, it is important to have numerical models that would take into account the main physical factors influencing the formation of contaminated areas, and on the other hand could be quickly implemented on computers of low and medium power [2, 4, 5].

Purpose

The aim of the work is to develop an efficient, fast computing numerical model for prediction of dust cloud dispersion after explosion in open pit mine.

Methodology

As it is known, the application of the Navier-Stokes equations to calculate the wind flow in open pit mine takes computing time. The calculation may take several days. Therefore, to create a fast-calculating computer model, the inviscid fluid model will be used.

Modeling equations. Introducing the assumption that airflow is potential, the basic equation of aerodynamics has the form [6, 9, 10]:

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

where P – is velocity potential, x, y – are Cartesian coordinates, m.

When applying this equation, it is assumed that the Y axis is directed vertically upwards.

To solve the equation (1) the following boundary conditions are used [6]:

1) on the walls of the open pit mine, as well as on other solid surfaces located inside it, a following boundary condition is set: $\partial P / \partial n = 0$, where n – is unit vector of external normal to solid wall;

2) at the inlet boundary we set: $\partial P / \partial n = V_n$, where V_n – known airflow velocity, $m \cdot s^{-1}$;

3) at the outlet boundary we set: $P = P_0 + \text{const}$, P_0 – is arbitrary number (Dirichlet condition).

To simulate the dispersion of dust in open pit mine, the mass transfer equation (Marchuk equation) is used [6, 9, 10]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (2)$$

where C – is dust concentration in the atmosphere, $\mu g \cdot m^{-3}$; u, v – are wind flow velocity components, $m \cdot s^{-1}$; w_s – is dust fallout speed, $m \cdot s^{-1}$; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – are turbulent diffusion coefficients, $m^2 \cdot s^{-1}$, x, y – are Cartesian coordinates, m; σ – coefficient of pollutant chemical decay, s^{-1} .

Initial and boundary conditions for (2) are discussed in [6].

Numerical model. Numerical integration of modeling equations is carried out using a rectangular difference grid.

Convective derivatives are represented as [6]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

where

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2}, v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

The approximation of these derivatives is carried out according to the formulas [6]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

The time derivative is approximated as follows:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t}.$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

To approximate the second derivatives, the following formulas are used [5]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) &\approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \tilde{\mu}_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) &\approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.\end{aligned}$$

Taking into account the above notation for difference operators, the original mass transfer equation is represented as:

$$\begin{aligned}\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + \\ + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{i,j}^{n+1} = \\ = \left(M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}\right).\end{aligned}$$

Further, splitting of this difference equation is carried out as following:

1) on the first step of splitting ($k = n+1/4$) the difference equation has the appearance:

$$\begin{aligned}\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L_x^+ C^k + L_x^- C^k\right) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ = \frac{1}{4}\left(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^k\right).\end{aligned}\quad (3)$$

2) on the second step of splitting ($k = n+1/2$; $c = n+1/4$) the difference equation has the appearance:

$$\begin{aligned}\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L_x^- C^k + L_x^+ C^k\right) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ = \frac{1}{4}\left(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^k\right).\end{aligned}\quad (4)$$

3) on the third step of splitting ($k = n+3/4$; $c = n+1/2$) the equation (4) is used;

4) on the fourth step of splitting ($k = n+1$; $c = n+3/4$) the equation (3) is used.

From equations (3) and (4) the unknown value of the dust concentration is calculated by explicit formula of running calculation.

For the numerical integration of velocity potential equation, Richards method was used. To solve the two-dimensional equation for the velocity potential, first of all, this equation was written in evolutionary form [6]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (5)$$

where t – fictitious time (dimensionless).

It is known, that when $t \rightarrow \infty$ the solution of this equation will approach to the Laplace equation solution for the velocity potential. To solve equation (5), it is necessary to set ‘initial’ field of velocity in computational region at $t = 0$. For example, before starting the calculation, you can set $P = 0$ in the entire computational domain for $t = 0$. Numerical integration of equation (5) is carried out on a rectangular grid. Function P is determined in the center of the difference cells.

Differential scheme (Richardson’s method) for numerical integration of the evolutionary equation (5) is written as:

$$\begin{aligned}P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^n - 2P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \\ + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^n - 2P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} = 0.\end{aligned}$$

The unknown value of the velocity potential is determined by the explicit running calculation formula. The calculation is completed when the following condition is fulfilled:

$$\left|P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^n\right| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

where ε – is a small number (e.g., $\varepsilon = 0.001$); n – iteration number.

After determining the velocity potential field, the components of the air velocity vector are calculated at the sides of the computational cell using formulae:

$$\begin{aligned}u_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \\ v_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.\end{aligned}$$

This approach to compute velocity components on the sides of computational cells allows con-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

structuring a conservative difference scheme for the mass transfer equation.

For practice, it is extremely important to reproduce the geometric form of the open pit mine. For this, in the numerical model we used porosity technique ('markers' method). The computational domain is divided using a rectangular difference grid (Figure 1). Using markers, we constructed open pit mine boundaries. Using other markers, we constructed the initial geometrical form of dust cloud in open pit mine. Other markers were used to construct the geometrical form of obstacle near open pit mine. This technique for computational region formation in numerical model allows to change quickly this form during numerical experiments. In Figure 1 the arrow indicates the wind direction.

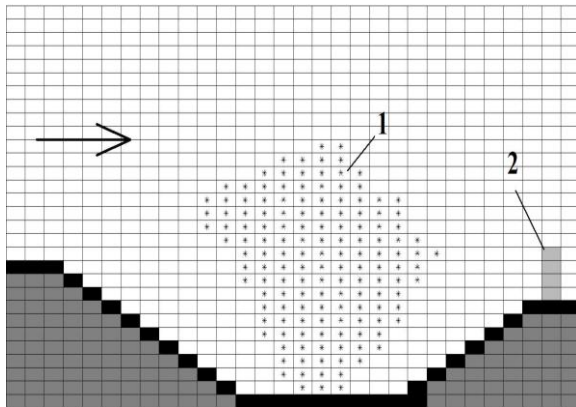


Fig. 1. Sketch of computational domain scheme:
1 – dust-gas cloud; 2 – obstacle (trees position)

The developed numerical model was coded using Fortran language.

Findings

Developed numerical model was used to compute dust cloud movement in open pit mine.

To make all parameters dimensionless, we have chosen the following scales [2]:

1) v_w is the wind velocity at the left boundary, $v_w = 8 \text{ m/s}$;

2) \tilde{L}_x , m is the length of the computational domain;

3) C_0 , $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ is the initial dust concentration in the cloud for $t = 0$.

The dimensionless parameters are calculated as follows:

1) $t = t_p \cdot v_w / \tilde{L}_x$, where t_p is time, s;

2) $C = C_p / C_0$, where C_p is dust concentration, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;

3) $L = L_p / \tilde{L}_x$, where L_p is length, m;

4) $v = v_p / v_w$, where v_p is local wind velocity, m/s.

The length of the computational domain is $L_x = 1$ (dimensionless), the height of the computational domain is $L_y = 1$ (dimensionless). The initial concentration of dust in the cloud is $C = 1$ (dimensionless) for $t = 0$.

Figures 2-8 show dust concentration field for different time after explosion in open mine. In Figures 2-8 the arrow indicates the wind direction.

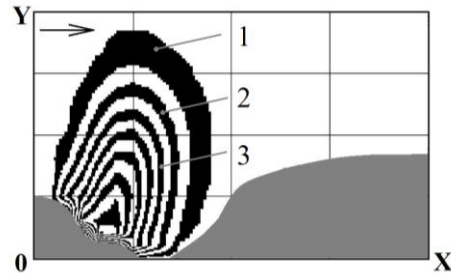


Fig. 2. Pollution zone: $t=0.1$ (time is dimensionless):
1 – $C=0.82$; 2 – $C=0.88$; 3 – $C=0.94$

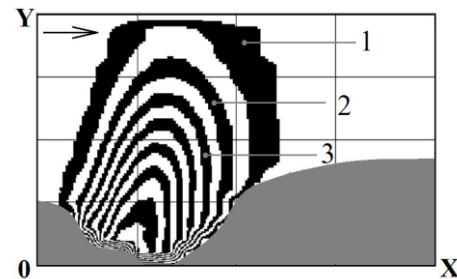


Fig. 3. Pollution zone: $t=10$ (time is dimensionless):
1 – $C=0.67$; 2 – $C=0.73$; 3 – $C=0.81$

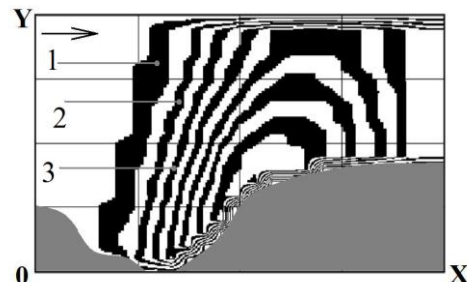


Fig. 4. Pollution zone: $t=35$ (time is dimensionless):
1 – $C=0.51$; 2 – $C=0.59$; 3 – $C=0.64$

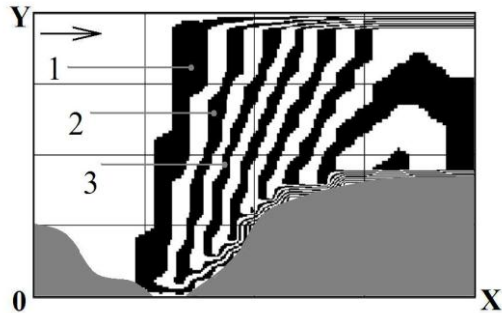


Fig. 5. Pollution zone: $t=48$
(time is dimensionless):
 $1 - C=0.42$; $2 - C=0.48$; $3 - C=0.55$

From Figures 2-5 we see deformation of dust cloud form in open pit mine. This dust cloud is expanding during the time as a result of atmospheric diffusion action.

Figures 6-8 show dust concentration field for different time after explosion in open mine but when obstacle was introduced at one side of the open pit mine.

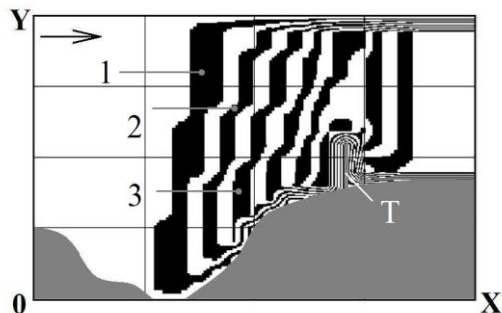


Fig. 6. Pollution zone: $t=39$
(time is dimensionless):
 T – obstacle, $1 - C=0.48$; $2 - C=0.56$; $3 - C=0.61$

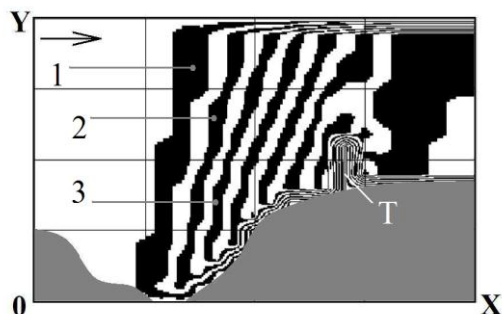


Fig. 7. Pollution zone: $t=48$
(time is dimensionless):
 T – obstacle, $1 - C=0.40$; $2 - C=0.46$; $3 - C=0.53$

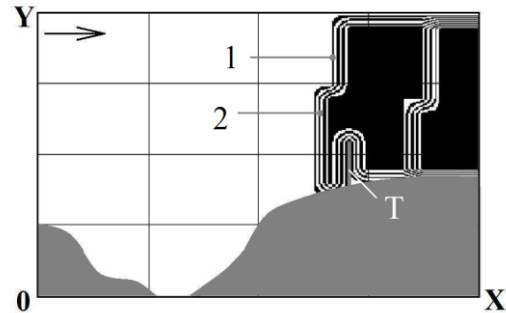


Fig. 8. Pollution zone: $t=67$ (time is dimensionless):
 T – obstacle, $1 - C=0.32$; $2 - C=0.41$

Figures 6-8 illustrate the process of dust cloud diffraction on the obstacle, the height of the obstacle is $L=0.2$ (dimensionless). This obstacle (see Figures 6-8, position T) simulates trees position near the open pit mine [7].

Worthy of note that computational time was 5 s.

Originality and practical value

New numerical model was developed to predict atmosphere pollution after blasts in open pit mines. The model is based on equation of dust dispersion in the atmosphere and equation for speed potential. To solve governing equations difference schemes of splitting were used. Proposed numerical model can be used for predictive calculations to assess the impact of explosions in open pit mines on the environment.

Conclusions

In this paper an effective numerical model for calculating the process of atmospheric pollution after explosion in open pit mine was developed. The model is based on the numerical integration of the equation for the velocity potential and the Marchuk equation. The difference schemes used have logical simplicity and convenient for programming. The calculation of the process of atmospheric pollution on the basis of the developed numerical model requires about 5 seconds of computer time. This allows to carry out serial calculations within one working day. Further development of this direction is associated with the creation of a three-dimensional numerical model of the atmospheric pollution process during explosion in open pit mine.

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. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
3. Бересневич, П. В. Аэрология карьеров : справочник / П. В. Бересневич, В. А. Михайлов, С. С. Филатов. – Москва : Недра, 1991. – 280 с.
4. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
5. Стоецкий, В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В. Ф. Стоецкий, В. И. Голинько, Л. В. Дранишников // Наук. вісн. НГУ. – 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.
7. Alvarez, J. T. Dust Barriers In Open Pit Blasts. Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations / J. T. Alvarez, I. D. Alvarez, S. T. Lougedo // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2008. – 116 p.
8. Bai, Y. Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation / Y. Bai // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 71. – P. 679–684. doi: <http://doi.org/10.3303/CET1871114>
9. 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: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
10. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
11. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations [Electronic resource] / Croner-i. – Available at: <http://clc.am/OnkmUw> – Title from the screen. – Accessed : 29.03.2019.
12. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Z. Naserzadeh, F. Atabi, F. Moattar, N. M. Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communications. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
13. Oyjinda, P. Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone / P. Oyjinda, N. Pochai // Advances in Mathematical Physics. – 2017. – Vol. 2017. – P. 1–7. doi: <http://doi.org/10.1155/2017/5287132>
14. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Electronic resource] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Available at: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Title from the screen. – Accessed : 23.04.2019.
15. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Electronic resource] / O. Zavila, P. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // The science for population protection. – 2015. – № 2. – Available at: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> – Title from the screen. – Accessed : 23.04.2019.

**В. В. БІЛЯЄВА^{1*}, П. С. КІРІЧЕНКО^{2*}, О. В. БЕРЛОВ^{3*}, В. О. ГАБРИНЕЦЬ^{4*},
В. М. ГОРЯЧКІН^{5*}**

^{1*}Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{2*}Каф. «Теплогазопостачання, водовідведення та вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{3*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{4*}Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

^{5*}Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПІД ЧАС РУХУ ПИЛОВОЇ ХМАРИ В КАР'ЄРІ

Мета. Вибухи в кар'єрах призводять до утворення пилових хмар, які інтенсивно забруднюють атмосферне повітря. Метою цієї роботи є розробка чисельної моделі для прогнозування забруднення атмосфери після вибуху в кар'єрі. Така чисельна модель повинна під час розрахунку враховувати геометричну форму кар'єру, параметри метеорологічної ситуації (швидкість вітру, стан атмосфери), форму пилової хмари, що утворюється в кар'єрі на місці вибуху. **Методика.** Математичне моделювання розсіювання пилової хмари під час вибуху в кар'єрі ґрунтується на використанні фундаментальних рівнянь аеродинаміки й масопереносу. Поле швидкості повітряного потоку в кар'єрі моделюється за допомогою рівняння Лапласа для потенціалу швидкості. Формування концентраційного поля пилу моделюється на основі рівняння конвективно-дифузійного розсіювання домішки. Для чисельного інтегрування моделювальних рівнянь використано різницеві схеми. Рівняння Лапласа для потенціалу швидкості чисельно інтегрується за допомогою методу Річардсона. Для чисельного інтегрування рівняння конвективно-дифузійного розсіювання домішки використано неявну різницеву схему розщеплення. **Результати.** Розроблено CFD – модель, яка дозволяє виконати розрахунок формування зон забруднення під час руху пилової хмари в кар'єрі. Особливістю розробленої моделі є швидкість розрахунку. Для її практичного використання необхідна стандартна вхідна інформація. **Наукова новизна.** На відміну від наявних в Україні моделей, розроблена чисельна модель дозволяє враховувати геометричну форму кар'єра й геометричну форму пилової хмари для проведення прогнозних розрахунків з оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час вибухів у кар'єрах. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути імплементована на комп'ютерах малої й середньої потужності використанням стандартної інформації про метеоумови в кар'єрі. Цю модель можна використовувати для екологічної оцінки впливу вибухів у кар'єрі на забруднення навколишнього середовища й робочих зон.

Ключові слова: пилова хмара; кар'єр; забруднення атмосфери; чисельне моделювання

В. В. БЕЛЯЕВА^{1*}, П. С. КИРИЧЕНКО^{2*}, А. В. БЕРЛОВ^{3*}, В. А. ГАБРИНЕЦ^{4*},
В. Н. ГОРЯЧКИН^{5*}

^{1*}Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассопереноса», Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{2*}Каф. «Теплогасоснабжение, водоотведение и вентиляция», Криворожский национальный университет, ул. Виталия Матусевича, 11, Кривой Рог, Украина, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, эл. почта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{3*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{4*}Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

^{5*}Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ ДВИЖУЩЕМСЯ ПЫЛЕВОМ ОБЛАКЕ В КАРЬЕРЕ

Цель. Взрывы в карьерах приводят к образованию пылевых облаков, которые интенсивно загрязняют атмосферный воздух. Целью данной работы является разработка численной модели для прогнозирования загрязнения атмосферы после взрыва в карьере. Эта численная модель должна при расчете учитывать геометрическую форму карьера, параметры метеорологической ситуации (скорость ветра, состояние атмосферы), форму пылевого облака, которое образуется в карьере на месте взрыва. **Методика.** Математическое моделирование рассеивания пылевого облака при взрыве в карьере основывается на использовании фундаментальных уравнений аэродинамики и массопереноса. Поле скорости воздушного потока в карьере моделируется с помощью уравнения Лапласа для

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

потенциала скорости. Формирование концентрационного поля пыли моделируется на базе уравнения конвективно-диффузионного рассеивания примеси. Для численного интегрирования моделирующих уравнений использованы разностные схемы. Уравнение Лапласа для потенциала скорости численно интегрируется с помощью метода Рундсона. Для численного интегрирования уравнения конвективно-диффузионного рассеивания примеси использована неявная разностная схема расщепления. **Результаты.** Разработана CFD – модель, которая позволяет выполнить расчет формирования зон загрязнения при движении пылевого облака в карьере. Особенностью разработанной модели является быстрота расчета. Для её практического использования необходима стандартная входная информация. **Научная новизна.** В отличие от существующих в Украине моделей, разработанная численная модель позволяет учитывать геометрическую форму карьера и геометрическую форму пылевого облака для проведения прогнозных расчетов по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха при взрывах в карьерах. **Практическая значимость.** Разработанная численная модель может быть имплементирована на компьютерах малой и средней мощности с использованием стандартной информации о метеословиях в карьере. Эту модель можно использовать для экологической оценки влияния взрывов в карьере на загрязнение окружающей среды и рабочих зон.

Ключевые слова: пылевое облако; карьер; загрязнение атмосферы; численное моделирование

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk: Analiz i otsenka: Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Beresnevich, P. V., Mikhaylov, V. A., Filatov, S. S. (1991). *Aerologiya karerov: spravochnik*. Moskva: Nedra. (in Russian)
4. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., Kirichenko, P. S., & Muntian, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoy Rog: Kozlov R. A. (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., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
7. Alvarez, J. T., Alvarez, I. D., & Lougedo, S. T. (2008). *Dust Barriers in Open Pit Blasts. Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations*. WIT Transactions on Ecology and the Environment. (in English)
8. Bai, Y. (2017). Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation. *Chemical Engineering Transactions*, 71, 679-684. doi: <http://doi.org/10.3303/CET1871114> (in English)
9. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
10. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. Dordrecht. doi: http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
11. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrieved from <http://clc.am/OnkmUw> (in English)
12. Naserzadeh, Z., Atabi, F., Moattar, F., & Nejad, N. M. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 10(1), 192-204. (in English)
13. Oyjinda, P., & Pochai, N. (2017). Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone. *Advances in Mathematical Physics*, 2017, 1-7. doi: <http://doi.org/10.1155/2017/5287132> (in English)
14. Government of Alberta. (2017). Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantage and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
15. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> (in English)

Received: March 18, 2019

Accepted: July 26, 2019

UDC 628.3:628.4.046

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

^{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 0000-0001-6082-7091

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

^{3*}Main Department of State Fiscal Service (SFS) in Kyiv, Sholudenka St., 33, Kyiv, Ukraine, 04116, tel. +38 (050) 164 22 32, e-mail dogni06@gmail.com, ORCID 0000-0002-2962-2722

TECHNOLOGY FOR WATER PURIFICATION FROM RESIDUES OF DRUGS AND PLASTIC

Purpose. The main purpose of the article is to develop a technology for water purification from residues of oil-fat-cream containing drugs, in particular technology and a technological scheme for purifying urban (municipal) wastewater from plastics and residues of drugs. **Methodology.** The studies were carried out based on the analysis of scientific sources and reporting data on the availability of drugs and plastics in the water of Ukraine, European countries, and the USA. **Findings.** The authors present the results of a comprehensive review of issues related to the determination of the availability of drugs in various waters, their concentrations and the most dangerous drugs-toxicants. Medicines and plastics can accumulate not only in humans and animals, but also in sea and river fish, etc. The presence of drugs and plastic in the body can have a negative impact on the health. The treatment facilities in Ukraine and the world are not sufficiently adapted for the detection of drugs and plastics and their purification. **Originality.** The authors of this material conducted studies to determine the content of plastic in drinking tap water in Dnipro and Zaporizhzhia cities. Drinking water from the tap contains less plastic particles than bottled water of the famous Ukrainian trade brands. The work developed technological schemes for the purification of industrial wastewater from pharmaceutical enterprises for the manufacture of creams, ointments, oils and other products for treatment and cosmetic purposes. Structures and methods for purifying water from these pollutants have been proposed, which had not been previously used at water purification stations, but successfully apply in other industries. **Practical value.** The use of environmentally efficient technologies in Ukraine will allow obtaining high-quality drinking water, but it will require re-equipment and reconstruction of water treatment plants. Major funding should be provided by corresponding articles. Currently, in Ukraine (even in Kyiv) there are no stations for the purification of drinking and waste waters, which would use modern technologies and facilities, but high-quality water is the health and life of people.

Keywords: wastewater treatment; drinking water treatment; plastic in wastewater and drinking water; drugs in wastewater; new sources of drinking water; technological scheme for water purification; concentration of hazardous drugs in water

Introduction

Today there is an intensive pollution of the Earth and its waters with medical preparations and plastic. In the course of research in recent years, a large number of medical, veterinary drugs and plastics have been found in many ecosystems of the globe and even in such distant areas as the Arctic and Antarctica.

In our opinion, if you do not take serious measures, the harm from drugs may exceed their benefits. It is necessary to switch to the production of environmentally friendly medicines and to improve the methods and technology of water purification.

Monitoring water quality in various countries of the world has shown that water is contaminated with drugs and plastics to one degree or another, but especially water is contaminated near all major cities. Traces of drugs and plastic lead to the emergence of unknown diseases. For a long time, it was considered that after using the medications completely destroyed. It has now been established that more than half of the drugs consumed leave the body in a biologically active form, i.e. practically do not lose their properties. In large quantities they enter sewage and, from there, sources of drinking water.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

There are currently no treatment facilities that can remove metabolites of drugs or other unregulated pollutants, such as personal care products. Metabolites of drugs are polar water-soluble substances, which are formed as a result of physical and biochemical processes [13]. The chemical reactions of metabolites in the aquatic ecosystem are still not fully understood. It should be borne in mind that drugs are initially developed with high biological activity, and, as a rule, they have high resistance in the environment. Since in many cases they are not biodegradable, even a low concentration of drugs and their metabolites can accumulate in the body of people, animals and fish [15].

There are a large number of ways in which drugs enter the surface waters. The main ones are: wastewater from pharmaceutical plants, municipal (municipal) treatment facilities, hospitals and landfills.

Today, the process of drug release into the environment through municipal wastewater treatment plants is best studied. It was established that not only the toilet, but also the bath and the washing machine serve as a source of pollution of lakes, rivers and oceans by flushing residual medicinal creams, lotions, ointments and gels into the sewage system [4]. The so-called active ingredients of pharmaceutical ingredients fall into drains and potentially pollute water and soil. Such substances include steroids (for example, cortisone and testosterone), acne preparations and other drugs. It is also noted that, in contrast to internal use, external medicinal products washed with water contain non-metabolizable drugs in their full form [8].

The concentration of drugs is different, but generally small, but scientists are seriously concerned about the possible consequences of prolonged use of even small doses of drugs with drinking water.

The greatest danger from the presence of drugs in water is that all these chemicals are consumed together. Researchers do not know what effect combinations of pharmaceuticals have on the body.

Purpose

The problem of drinking water quality worries millions of people in Ukraine and the world, regardless of the regions in which they live.

The purpose of this article is to analyze the presence in Ukraine and the world of the residual amount of drugs in water, as well as develop the technology and provide a technological scheme for purifying water from oil-fat-cream containing drugs and, on the basis of global and personal experience, and also provide technology for cleaning municipal wastewater.

Methodology

Wastewater from drug manufacturing plants are formed [9]:

- in the preparation of raw materials;
- in technological processes of obtaining intermediate and finished products;
- at regeneration and utilization of solvents;
- at water purification of gas emissions;
- in the processes of filtration, extraction, chemical cleaning of drugs;
- when washing equipment, etc.

Tables 1 and 2 show the amount of industrial wastewater and their characteristics, which are formed during the preparation of some common medicinal preparations [9].

Findings

The highest contamination is characteristic of uterine and concentrated solutions, the discharge of which into the sewer system is unacceptable. In particular, the concentrated solution formed during the production of amidopirin is characterized by a COD equal to 64000 mg/dm³, the dry residue is 40000 mg/dm³, the dilution threshold for the destruction of the color is 1: 250.

The nomenclature and quantity of products produced by enterprises for the production of medicines, as a rule, are not constant, but change during the year and even in a shorter period, therefore it is impossible to determine the composition of wastewater, which would be constant and characteristic of the enterprise as a whole [9].

The analysis of the cost structure of wastewater treatment once again confirmed the important conclusion that mechanical purification is to some extent the cheapest method, and therefore the most profound wastewater treatment by mechanical methods is always advisable [5].

This conclusion primarily requires that the technology and equipment for the retention of me-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

chanical inclusions from wastewater provide the maximum retention of coarse impurities to reduce the dry mass of the raw sludge and, accordingly, associated problems. (Fig. 1) For trapping fat, plastic [11,12], pieces of fat, etc., we use filtering machines – arc sieves, OSO centrifugal sieves, flat screens, etc. [5].

The sizes of the filtering holes vary widely: from 20 mm (gratings at pumping stations) to 0.07–0.1 – 1.0 mm (arc sieves, screens, etc.). Slot-shaped sieves with trapezoidal openings are installed on the strainers, which are not clogged by suspended wastewater particles [5].

Table 1

Characteristics of wastewater of drugs production enterprises (common sewage)

View products	Average annual volume of wastewater, m ³ per 1 ton of products	Concentration of pollution, mg/dm ³						BOD mgO ₂ / dm ³	COD, mgO ₂ / dm ³	pH	
		Suspended substances	Nitrogen ammonium	Chlorides	Sulfates	Butanol	Butyl acetate				Other substances
Vitamins: C, B ₂ , B ₆	from 66 to 4230	from 70 to 1 500	From 18.8 to 33	from 100 to 1100	from 28 to 320	-	-	2.4 (phosphorus) 12 (cyanide)	from 420 to 2430	from 610 to 5400	from 4 to 11
Antibiotics: phenoxypenicillin, hydroxy tetracycline, streptomycin, benzylpenicillin	from 4230 to 9860	from 100 to 300	from 2 to 40	-	-	from 200 to 800	from 200 to 800	methanol antibiotics	from 1 500 to 2 500	from 2 500 to 4 000	from 6,0 to 7,5
Synthetic drugs: amidopyrine, caffeine, norsulfazole, sulfomezin, furatselin, hexanal, chloroethane	from 1400 to 9800	210	175 – 38	2 300 – 2 200	2 390 – 325	-	-	816 (zinc) 9 (phosphorus)	4 870 – 2 756	7 850 – 3 650	

Table 2

Characteristics of wastewater of production enterprises of fat-containing substances (common sewage).

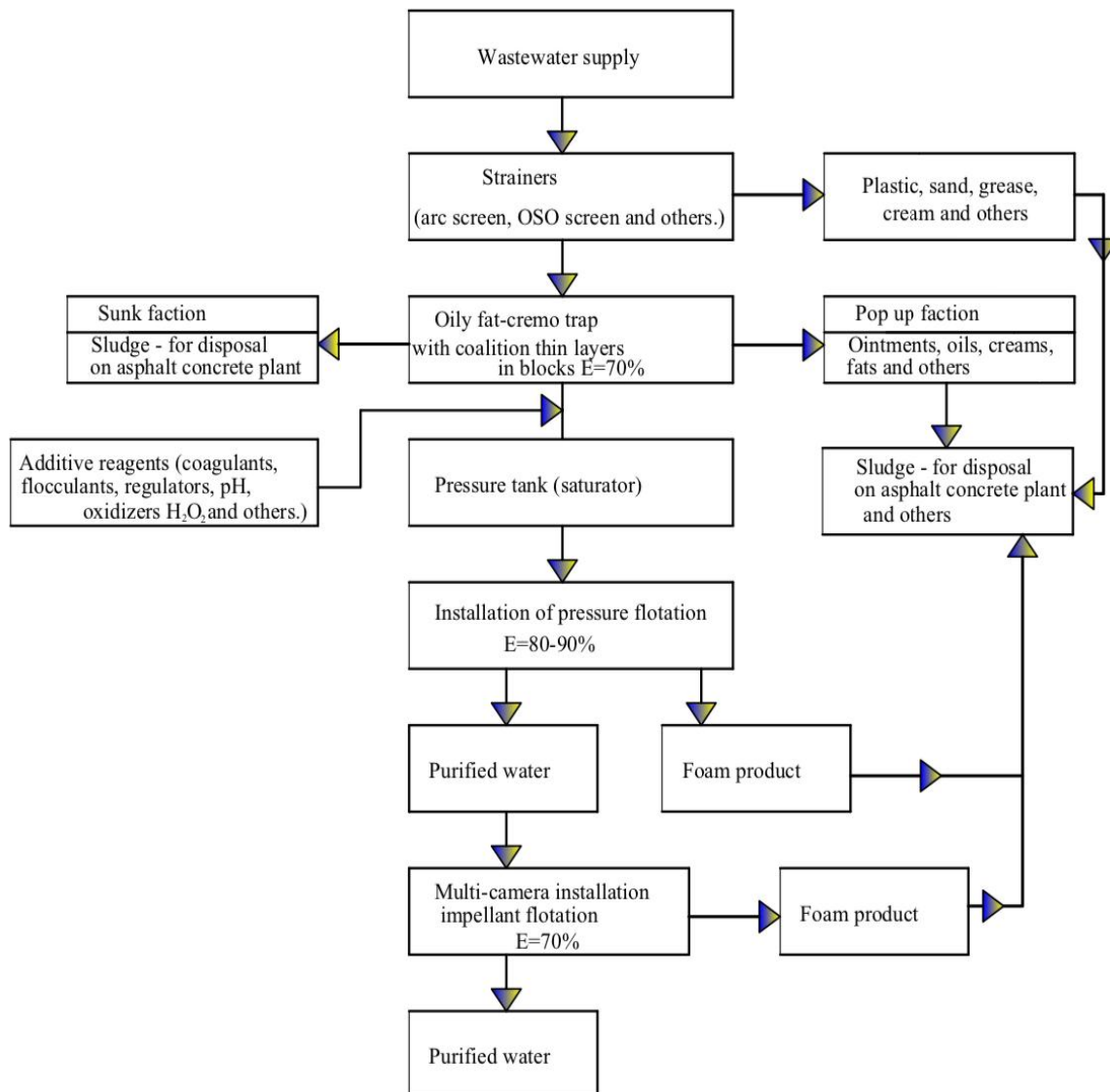
View products	pH	Fat, mg / l	Glycerol, mg / l	Petrol, mg / l	BOD mgO ₂ / dm ³	COD, mgO ₂ / dm ³
Oil extraction	7	200		180-300	1 200	1 500
Hydrogenation	5	100			200	250
Refining	9	20 000			40 000	50 000
Margarine	9	7 000			1 400	15 000
Mayonnaise	8	16 000			33 000	38 000
Soap making	10	20 000	20 000		10 000	120 000
Glycerol and LCD	6	150	200		500	600

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

As a result of purification of rainwater and industrial wastewater from petroleum products and suspended solids, we [5] found that using pumping equipment before sewage treatment plants leads to emulsification of petroleum products in the common sewage volume, which increases the time of their gravitational separation and, accordingly, to clean the load on the filters. These findings can be fully attributed to the purification of fat-oil-cream-containing drugs. In addition, the presence of fat in water reduces the solubility of oxygen, which adversely affects the purification of water, especially by biological methods.

Originality and practical value

Further, wastewater (Fig. 1) in the technological chain is fed to an oil-fat-cream trap with coalescent thin-layer blocks (Fig. 2 – photo). If a conventional oil trap has a cleaning effect of about 30-40% for separating lubricants, oils, petroleum and petroleum products, the proposed oil-fat-cream trap already has a cleaning effect of about 60-75%. This was confirmed by laboratory (pilot) tests in which animal fats, petroleum jelly, coolant, oil products, and other hydrophobic substances were used as wastewater pollutants.



Pic. 1. Technological scheme of industrial wastewater treatment from oil-fat-cream-containing drugs (proposed)



Fig. 2. Oil-fat-cream trap with thin-layer coalescent blocks

One of the effective methods of wastewater treatment from hydrophobic contaminants, including oils, esters, petroleum products and other substances is PCM – flotation (physico-chemical method) with dispersed air and gas bubbles [5]. The result of this process in different conditions depends on the size of the air bubbles: with a decrease in their diameter, the cleaning efficiency increases.

There are several types of flotation. The most common is the method of pressure flotation, in which fine air bubbles are formed due to changes in the partial pressure of the water-air solution obtained by pre-saturation of water with air under pressure of 4-5 atm. This method is considered to be the most effective, as it provides a fairly stable dispersed composition of air bubbles, but it also has its drawbacks.

Another method is impeller flotation, in which the dispersion of air is carried out with the help of an impeller. The air is drawn from the atmosphere into the zone of its action and is crushed into small bubbles. Many designs of impeller dispersants are known, but the designs in which the impeller rotates inside the stator are most interesting.

Impeller flotation has found wide use of minerals, in the field of wastewater treatment, the use of this method is still limited. Research on the use of impeller flotation to extract fat from wastewater generated during the washing of wool was conducted at the «NII VODGEO» (integrated scientific research and design and technological institute

of water supply, sewerage, hydrotechnical structures and engineering hydrogeology) [5]. The effect of fat extraction reaches 94% with a duration of treatment of 1 hour. Due to the high content of surfactants (soaps, fatty acids) in wool-rich water, up to 87% of water can be transferred to the froth product.

The studies of the application of this method for sewage treatment of meat processing plants are known [18].

It is noted that in the two-chamber flotation machine M6 (Mekhanobr developer), with the duration of wastewater treatment for 15 minutes, the effect of water purification from fat reached 70%, by suspended substances – 64%.

Extensive studies of the application of this method for the treatment of wastewater of fish factories were conducted at the Petersburg University of Civil Engineering, a high degree of extraction of fats (99%) and suspended substances (86.5%) was established.

In all these works, studies were carried out on flotation machines manufactured by industry for the enrichment of mineral resources.

Thus, in our technological scheme we use flotation units of two types – pressure and impeller. To improve the efficiency of flotation treatment of industrial wastewater after pharmaceutical companies, we recommend the addition of various reagents:

- pH regulators, determined experimentally;
- coagulants and flocculants – for the formation of hydrophobic complexes in order to increase the efficiency of the process, determined experimentally;
- oxidizers (for example, hydrogen peroxide H₂O₂), which contribute to the oxidation of many drugs [4]; the concentration of the dosage of the reagent is determined experimentally.

Our industrial tests at a railway enterprise for deep cleaning of oily waste water using 2-stage flotation (pressure and impeller) with additional treatment on filters with urethane foam (1st stage) and on adsorption filters (stage 2), allowed reduce the oil content from 20,000 to 0.05 mg/dm³ [5].

As noted above, our and foreign municipal (city) wastewater treatment plants do not have facilities for separating and treating water from plastic and residues of drugs. We have attempted to

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

develop a technology and technological scheme for the treatment of municipal (urban) wastewater treatment (Fig. 3) and drinking water (Fig. 4) for the population from the above-mentioned pollution.

For the separation of coarse contaminants in wastewater, the stations have standard gratings of various designs with openings no more than 16 mm, in other countries the openings size was changed to a smaller one (about 6-10 mm). At the same time, the size of the plastic coming with water for cleaning can be as a human hair [5].

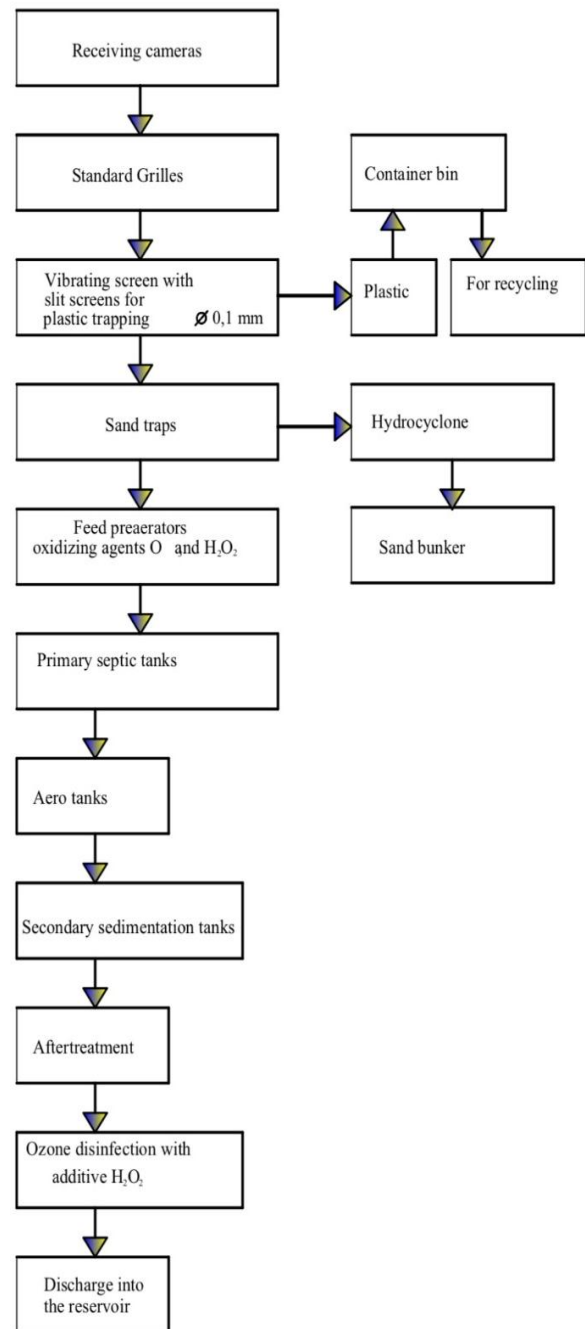
The authors of this material conducted studies to determine the content of plastic in drinking tap water in the cities of the Dnipro and Zaporizhia. For example, drinking water from the tap contains from 4 to 10 particles of plastic per liter of water, the size of which exceeds 100 microns, that is, the average thickness of a human hair. And in bottled water of well-known trademarks «Morshinska» and «BUVETTE» contains from 49 to 102 particles of plastic per liter of water [5].

We propose, after gratings, to put vibrating or inertial screens on which slit-like sieves with hole sizes from 0.07 to 0.25 mm will stand. Such slotted sieves will be able to trap not only plastic, but also coarse sand. In order to save electricity, instead of vibrating or inertial screens, fixed [2, 11] arc sieves can be installed (Pic.5).

We propose to place vibrating or inertial screens after the gratings, on which slit-like sieves with hole sizes from 0.07 to 0.25 mm should stand. Such sieves are capable of not only plastic, but also coarse sand. In order to save electricity, instead of vibrating or inertial screens, fixed [2,11] arc sieves can be installed (Fig. 5).

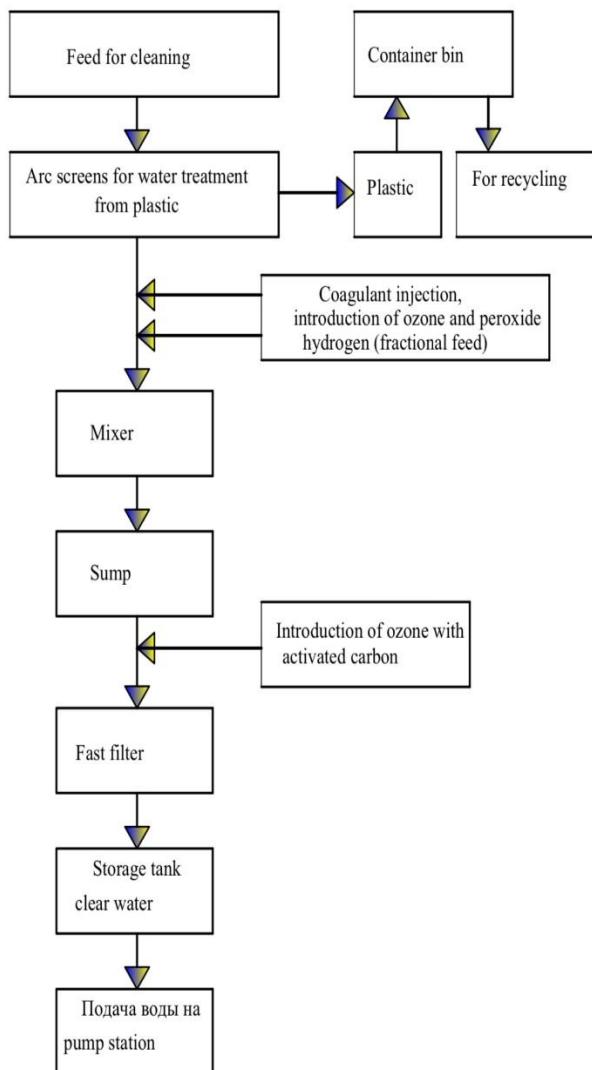
Slit screen stainless steel screens are used as flat maps, arc screens and centrifuges for dewatering, filtration washing, drying and sorting of various bulk and lump materials. They are used in the mining, chemical and food industries [17]. They are made of profiled trapezoidal grates, arranged in parallel on the transverse stiffening ribs or on the connecting pins. Stainless steel grade 12 × 18H10T or its analogues are used as the material. The slot size varies from 0.07 to 20 mm.

The company «ROTO-SIEVE» (Sweden) produces rotating sieves for pre-treatment of wastewater. This equipment has been successfully used in many countries [16].



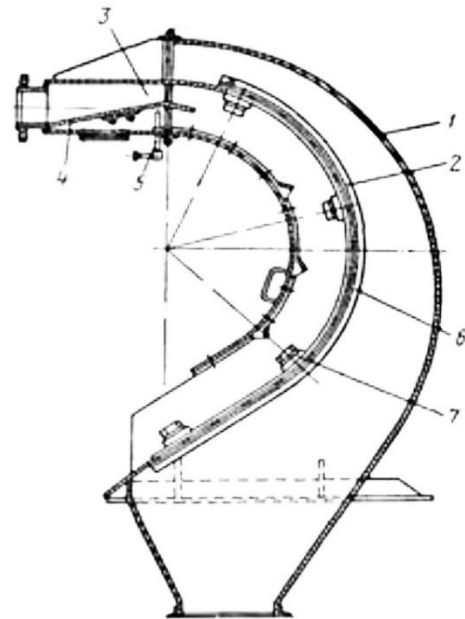
Pic 3. Technological scheme of purification of municipal (urban) waste waters from residues of drugs and plastics (proposed)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА



Pic. 4. Technological scheme of purification of drinking water from the residues of drugs and plastic (proposed)

For the purification of waste and drinking water from the remnants of medicines we have chosen chemical methods [4, 8, 12]. Chemical water purification is used in cases where the release of contaminants, including drugs, is possible only as a result of a chemical reaction between the impurity (drug) and the reagent, with the formation of new substances that are easily removed from the water. For such purification, oxidation reactions are used, transfer of harmful impurities into harmless ones, neutralization by the ozonation method [4, 3].



Pic. 5. Arc sieve:

- 1 – welded closed box; 2 – semi-cylindrical slit sieve;
 3 – loading opening, 4 – metal sheet, to regulate the size of the loading slot; 5 – screws for adjusting the gap;
 6 – support from the corners; 7 – wooden wedges.

The redox potential of ozone is higher than that of oxygen and chlorine, as a result of which it has a higher oxidative and bactericidal effect. It should be noted that water treatment with ozone or ultraviolet rays almost completely supplanted chlorination at water treatment plants in many countries of Western Europe (Switzerland, France, Norway, etc.) [12]. In Ukraine, the use of these environmentally efficient technologies is limited due to the significant cost of retooling and reconstruction of water treatment plants, but this must be done.

Ozonation includes both direct oxidation of organic compounds or disinfection with ozone dissolved in water, and oxidative processes involving hydroxyl radicals resulting from chemical transformations of salts. It is the latest processes that are considered as new oxidation technologies. At the same time, if the standard ozone reduction potential is 2.07 V, then for hydroxyl radicals this indicator reaches 2.8 V [8].

The formation of hydroxyl radicals as a result of the transformation of ozone in an aqueous medium increases in the presence of hydrogen peroxide, catalysts, activated carbon, when ozonation is combined with ultraviolet radiation and ultrasonic treatment [8].

Conclusions

Currently, there is intense pollution of the Earth's waters with medicines and plastics. In the course of research in recent years, a large number of medical and veterinary drugs and plastics have been found in many ecosystems of the globe and even in such remote areas as the Arctic and Antarctica.

Scientists from all over the world have discovered various groups of drugs in rivers, lakes and deep aquifers:

- antibiotics;
- anti-inflammatory drugs;
- steroid hormones;
- - contraceptives;
- cardiovascular drugs;
- antiepileptic drugs;
- drugs for weight loss and obesity fight;
- highly toxic anticancer drugs;
- cosmetics and perfumery products;
- antidepressants, psychotropic, sleeping pills;
- contrast agents used in x-ray diagnostic;
- antifungal agents.

Another environmental threat on a global scale is the presence of plastic in various waters, including drinking and waste waters.

There are two ways to solve these problems:

- The first is the creation of environmentally friendly medicines, the creation of biodegradable plastics or the prohibition of their manufacture;

- the second – the improvement of existing and the creation of new effective methods, technologies and technological schemes for the purification of water from medical preparations and plastics.

We have developed a technology, facilities and a technological scheme for the purification of industrial waste pharmaceutical enterprises from oil-fat-cream containing drugs and plastics. This technology uses high-performance mechanical cleaning facilities – oil-fat-cream trap with coalescent thin-layer blocks and 2-step flotation cleaning – with pressure and impeller flotation cells (physical and chemical cleaning).

For trapping plastic in all enterprises where wastewater and drinking water are treated, we propose constructions – strainers (vibrating and inertial screens, arc screens, etc.) with a hole diameter from 0.07 to 0.25 mm in slit-shaped screens.

To purify water from residues of drugs at municipal stations for the preparation of drinking water and wastewater treatment, technologies have been developed using chemical methods (ozone and hydrogen peroxide).

The use of these environmentally efficient technologies in Ukraine will allow obtaining high-quality drinking water, but will require re-equipment and reconstruction of water treatment plants.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Баренбойм, Г. М. Загрязнение природных вод лекарствами / Г. М. Баренбойм, М. А. Чиганова. – Москва : Наука, 2015. – 283 с.
2. Бедрань, Н. Г. Машины для обогащения полезных ископаемых : учеб. пособие для вузов / Н. Г. Бедрань. – Киев ; Донецк : Вища школа, 1980. – 416 с.
3. Биосорбция прокаина на биологически активном угле / Е. А. Корж, Н. А. Клименко, С. К. Смолин, Л. Р. Решетняк // Химия и технология воды. – 2016. – Т. 38, № 5. – С. 519–530.
4. Долина, Л. Ф. Очистка вод от остатков лекарственных препаратов / Л. Ф. Долина, О. П. Савина // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 3 (75). – С. 36–49. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/134675>
5. Долина, Л. Ф. Очистка вод от пластика / Л. Ф. Долина, О. П. Савина, Д. А. Долина // Наука та прогрес транспорту. – 2019. – № 2 (80). – С. 27–40. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/166628>
6. Корж, Е. А. Кинетика адсорбции фармацевтических веществ из водных растворов на активных углях / Е. А. Корж, С. К. Смолин, Н. А. Клименко // Химия и технология воды. – 2016. – Т. 38, № 4. – С. 342–353.
7. Кофман, В. Я. Новые окислительные технологии очистки воды и сточных вод. Ч. 2 : обзор зарубежных изданий / В. Я. Кофман // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 11. – С. 70–77.
8. Лившиц, В. Лекарства как экологическая проблема [Electronic resource] / Проза.ру. – Available at: <http://proza.ru/2013/02/27/1830> – Title from the screen. – Accessed : 04.06.2019.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

9. Технологический-экологический инжиниринг при обогащении полезных ископаемых : учеб. пособие / А. Д. Полулях, П. И. Пилов, А. И. Ергунов, Д. А. Полулях. – Днепропетровск : Гос. высш. учеб. завед. «Нац. горный ун-т», 2012. – 712 с.
10. Фармацевтические средства в питьевой воде [Electronic resource] / Всемирная организация здравоохранения – Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/ru/ – Title from the screen. – Accessed : 04.06.2019.
11. Шпаков, А. Антибиотики и стероиды отравляют сточные воды [Electronic resource] : Смерть из канализации / А. Шпаков // Коммерсант. – 1999. – 26 июн. – Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/220792> – Title from the screen. – Accessed : 04.06.2019.
12. Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks / M. A. Browne, P. Crump, S. J. Niven, E. Teuten, A. Tonkin, T. Galloway, R. Thompson // Environmental Science & Technology. – 2011. – Vol. 45. – Iss. 21. – P. 9175–9179. doi: <http://doi.org/10.1021/es201811s>
13. Boxall, A. B. A. The environmental side effects of medication / A. B. A. Boxall // EMBO reports. – 2004. – Vol. 5. – Iss. 12. – P. 1110–1116. doi: <http://doi.org/10.1038/sj.embor.7400307>
14. Occurrence and ecotoxicological assessment of pharmaceuticals: Is there a risk for the Mediterranean aquatic environment? / F. Desbiolles, L. Malleret, C. Tiliacos, P. Wong-Wah-Chung, I. Laffont-Schwob // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 639. – P. 1334–1348. doi: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.351>
15. Sharma, S. Microplastic pollution, a threat to marine ecosystem and human health: a short review / S. Sharma, S. Chatterjee // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – Vol. 24. – Iss. 27. – P. 21530–21547. doi: <http://doi.org/10.1007/s11356-017-9910-8>
16. Slaughterhouse wastewater: treatment, management and resource recovery / C. F. Bustillo-Lecompte, M. Mehrvar // Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery / Editors R. Farooq, Z. Ahmad. – Rijeka, Croatia : InTech Open Access Publisher, 2017. – P. 153–174. doi: <http://doi.org/10.5772/65499>
17. Sumpter, J. P. Pharmaceuticals in the Environment: Moving from a Problem to a Solution / J. P. Sumpter // Green and Sustainable Pharmacy / Editors K. Kummerer, M. Hempel. – Berlin : Springer-Verlag, 2010. – P. 11–22.
18. Waters reality in Ukraine worldwide / L. F. Dolina, P. B. Mashykhina, A. A. Karpo, A. A. Mishchenko // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 5 (71). – С. 7–18. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2017/113695>

Л. Ф. ДОЛИНА^{1*}, П. Б. МАШИХІНА^{2*}, Д. А. ДОЛИНА^{3*}

^{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 gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-6082-7091

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

^{3*}Головне управління Державної фіскальної служби (ДФС), вул. Шолуденка, 33, Київ, Україна, 04116, тел. +38 (050) 164 22 32, ел. пошта dogni06@gmail.com, ORCID 0000-0000-0002-2962-2722

ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ЗАЛИШКІВ ЛІКАРСЬКИХ ПРЕПАРАТІВ ТА ПЛАСТИКУ

Мета. Основна мета статті – розробити технологію очищення води від залишків масло-жиро-крем вмісних ліків, зокрема технологію очищення міських (муніципальних) стічних вод від пластику і залишків лікарських препаратів. **Методика.** Дослідження виконані на підставі аналізу наукових джерел і звітних даних про наявність ліків і пластику у водах України, європейських країнах, США. **Результати.** Автори представляють результати комплексного розгляду питань, пов'язаних із визначенням наявності ліків у різних водах, їх концентрацій і найбільш небезпечних лікарських препаратів-токсикантів. Медикаменти й пластик можуть накопичуватися не тільки в організмі людей і тварин, а й у морській і річковій рибі і т. д. Присутність в організмі ліків і пластику негативно впливає на здоров'я. Очисні споруди України та світу недостатньо пристосовані для виявлення у воді ліків і пластику, її очищення. **Наукова новизна.** Автори цієї статті провели

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

дослідження з визначення вмісту пластику в питній водопровідній воді міст Дніпра й Запоріжжя. Питна вода з-під крана містить менше частинок пластику, ніж бутильована вода відомих українських торгових брендів. Розроблені технологічні схеми з очищення стічних вод фармацевтичних підприємств із виготовлення кремів, мазей, масел та іншої продукції для лікування й косметичних цілей. Запропоновано споруди й методи для очищення вод від зазначених, забруднень, які не використовували раніше на станціях очистки вод, але успішно застосовують в інших галузях промисловості. **Практична значимість.** Застосування в Україні екологічно ефективних технологій дозволить отримувати високоякісну питну воду, проте вимагає переобладнання й реконструкції водоочисних станцій. Для цього потрібно передбачити відповідні статті за основним фінансуванням. У наш час в Україні (навіть у Києві) немає станцій з очищення питної і стічних вод, на яких би використовувались сучасні технології і споруди, але ж якісна вода – це здоров'я і життя людей.

Ключові слова: очищення стічних вод; очищення питної води; пластик у стічній та питній водах; ліки в стічних водах; нові джерела питної води; технологічна схема з очищення вод; концентрація небезпечних ліків у воді

Л. Ф. ДОЛИНА^{1*}, П. Б. МАШИХИНА^{2*}, Д. А. ДОЛИНА^{3*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-6082-7091

^{2*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

^{3*}Главное управление Государственной фискальной службы (ГФС), ул. Шолуденко, 33, Киев, Украина, 04116, тел. +38 (050) 164 22 32, эл. почта dogni06@gmail.com, ORCID 0000-0000-0002-2962-2722

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ОСТАТКОВ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ И ПЛАСТИКА

Цель. Основная цель статьи – разработать технологию очистки воды от остатков масло-жиро-крем содержащих лекарств, в частности технологию очистки городских (муниципальных) сточных вод от пластика и остатков лекарственных препаратов. **Методика.** Исследования выполнены на основании анализа научных источников и отчетных данных о наличии лекарств и пластика в воде Украины, европейских странах, США. **Результаты.** Авторы представляют результаты комплексного рассмотрения вопросов, связанных с определением наличия лекарств в различных водах, их концентраций и наиболее опасных лекарственных препаратов-токсикантов. Медикаменты и пластик могут накапливаться не только в организме людей и животных, но и в морской и речной рыбе и т. д. Присутствие в организме лекарств и пластика оказывает негативное влияние на здоровье. Очистные сооружения Украины и мира недостаточно приспособлены для обнаружения в воде лекарств и пластика, её очистки. **Научная новизна.** Авторы этой статьи провели исследования по определению содержания пластика в питьевой водопроводной воде городов Днепра и Запорожья. В питьевой воде из-под крана содержится меньше частиц пластика, чем в бутилированной воде известных украинских торговых брендов. Разработаны технологические схемы по очистке сточных вод фармацевтических предприятий по изготовлению кремов, мазей, масел и другой продукции для лечения и косметических целей. Предложены сооружения и методы для очистки вод от указанных загрязнений, которые не использовались ранее на станциях очистки вод, но успешно применяют в других отраслях промышленности. **Практическая значимость.** Применение в Украине экологически эффективных технологий позволит получать высококачественную питьевую воду, однако потребует переоборудования и реконструкции водоочистных станций. Для этого нужно предусмотреть соответствующие статьи по основному финансированию. В настоящее время в Украине (даже в Киеве) нет станций по очистке питьевой и сточных вод, на которых бы использовались современные технологии и сооружения, а ведь качественная вода – это здоровье и жизнь людей.

Ключевые слова: очистка сточных вод; очистка питьевой воды; пластик в сточной и питьевой воде; лекарства в сточных водах; новые источники питьевой воды; технологическая схема по очистке воды; концентрация опасных лекарств в воде

REFERENCE

1. Barenboym, G. M., & Chiganova, M. A. (2015). *Zagryaznenie prirodnykh vod lekarstvami*. Moscow: Nauka. (in Russian)
2. Bedran, N. G. (1980). *Mashiny dlya obogashcheniya poleznykh iskopaemykh: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Kiev; Donetsk: Vishcha shkola. (in Russian)
3. Korzh, E. O., Klymenko, N. A., Smolin, S. K., & Reshetnyak, L. R. (2016). Biosorption of procaine on biologically active carbon. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 38(5), 519-530. (in Russian)
4. Dolina, L. F., & Savina, O. P. (2018). Water cleaning from residues of medicinal preparations. *Science and Transport Progress*, 3(75), 36-51. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/134675> (in Russian)
5. Dolina, L. F., Savina, O. P. & Dolina D. A. (2019). Cleaning water from plastic. *Science and Transport Progress*, 2(80), 27-40. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/166628> (in Russian)
6. Korzh, Y. A., Smolin, S. K., & Klimenko, N. A. (2016). Kinetika adsorbtsii farmatsevticheskikh veshchestv iz vodnykh rastvorov na aktivnykh uglyakh. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 38(4), 342-353. (in Russian)
7. Kofman, V. Y. (2013). New advanced oxidation technologies of water and wastewater treatment. Pt. 2: foreign publications review. *Water Supply and Sanitary Technique*, 11, 70-77. (in Russian)
8. Livshits, V. (n.d.). Lekarstva kak ekologicheskaya problema. *Proza.ru*. Retrieved from <http://proza.ru/2013/02/27/1830> (in Russian)
9. Polulyakh, A. D., Pilov, P. I., Yegurnov, A. I., & Polulyakh, D. A. (2012). *Tekhnologo-ekologicheskii inzhiniring pri obogashchenii poleznykh iskopaemykh: Uchebnoe posobie*. Dnepropetrovsk: Gosudarstvennoe vysshee uchebnoe zavedenie «Natsionalnyy gornyy universitet». (in Russian)
10. Farmatsevticheskie sredstva v pitevoy vode (n.d.). *World Health Organization*. Retrieved from http://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/ru/ (in Russian)
11. Shpakov, A. (1999, June 26). Antibiotiki i steroidy otravlyayut stochnye vody: Smert iz kanalizatsii. *Kommersant*. Retrieved from <https://www.kommersant.ru/doc/220792> (in Russian)
12. Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175-9179. doi: <http://doi.org/10.1021/es201811s> (in English)
13. Boxall, A. B. A. (2004). The environmental side effects of medication. *EMBO Reports*, 5(12), 1110-1116. doi: <http://doi.org/10.1038/sj.embor.7400307> (in English)
14. Desbiolles, F., Malleret, L., Tiliacos, C., Wong-Wah-Chung, P., & Laffont-Schwob, I. (2018). Occurrence and ecotoxicological assessment of pharmaceuticals: Is there a risk for the Mediterranean aquatic environment? *Science of the Total Environment*, 639, 1334-1348. doi: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.351> (in English)
15. Sharma, S., & Chatterjee, S. (2017). Microplastic pollution, a threat to marine ecosystem and human health: a short review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(27), 21530-21547. doi: <http://doi.org/10.1007/s11356-017-9910-8> (in English)
16. Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. (2017). Slaughterhouse wastewater: treatment, management and resource recovery. In R. Farooq, Z. Ahmad (Eds.), *Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery*. Rijeka, Croatia: InTech Open Access Publisher (pp. 153-174). doi: <http://doi.org/10.5772/65499>
17. Sumpter, J. P. (2010). Pharmaceuticals in the Environment: Moving from a Problem to a Solution. In K. Kummerer, & M. Hempel (Eds.), *Green and Sustainable Pharmacy* (pp. 11-22). Berlin: Springer-Verlag. (in English)
18. Dolina, L. F., Mashykhina, P. B., Karpo, A. A., & Mishchenko, A. A. (2017). Waters reality in Ukraine worldwide. *Science and Transport Progress*, 5(71), 7-18. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2017/113695> (in English)

Received: March 14, 2019

Accepted: July 17, 2019

UDC 628.35

A. Y. OLEYNIK¹, T. S. AIRAPETIAN², S. M. KURGANSKA³¹Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Zheliabov St., 8/4, Kyiv, Ukraine, 03057, tel. +38 (050) 559 72 89, +38 (044) 459 65 10, e-mail Oleynik2019Al@gmail.com, ORCID 0000-0002-9110-1709²Dep. «Water Supply, Sewerage and Purification of Waters», O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshal Bazhanov St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 33 40, +38 (057) 707 31 06, e-mail Tamara.Ayrapetyan@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-8834-5622³Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Zheliabov St., 8/4, Kyiv, Ukraine, 03057, tel. +38 (063) 917 87 84, e-mail kurganska@ukr.net, ORCID 0000-0002-7593-6458**EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF AEROTANKS DUE TO ADD-ON ATTACHED BIOCEANOSIS**

Purpose. The research involves the implementation of comparative calculations to evaluate the performance of aerotanks with add-on attached biocenosis (biofilm). **Methodology.** For improving the performance of the aerotanks due to the introduction of an additional load with attached biocenosis (biofilm), the authors constructed the mathematical models that consider the simultaneous oxidation of organic pollutants with suspended and attached biocenosis. Based on these models, the methods were developed for calculating clarification parameters. The authors performed evaluation of the influence of various clarification factors in aerotanks. They proved that the clarification intensity is increased due to additional elements with the attached biocenosis. Herewith, possible technological and structural schemes of aerotanks were considered, when the loading elements (nozzles, screens, etc.) are located throughout the whole volume or more densely and compactly only in its individual sections. **Findings.** The parameters of effluent clarification from organic pollution in the aerotanks are determined using numerical methods. The graphs show the significant performance of aerotanks due to the introduction of the additional load with the attached biocenosis (biofilm). The calculations of the effect of additional loading on the performance of complete-mix aerotanks and continuous-flow aerotanks show that the use of immobilized biocenosis can improve the quality of removal of organic pollutants by 2-5 times. **Originality.** The authors substantiated scientifically the influence of various factors of wastewater treatment in aerotanks, the efficiency of which is increased due to additional elements with the attached biocenosis. **Practical value.** The introduction of research results in wastewater treatment plants can significantly improve the quality of the removal of organic pollutants by biological methods. The implementation of the calculation methods for the proposed dependencies makes it possible to more fully and reasonably take into account important processes that significantly affect the utilization of organic pollutants and the efficiency of the aerotanks with the additional involvement of wastewater treatment by the attached biocenosis.

Keywords: aerotanks-reactors; attached biocenosis (biomass); biofilm, active sludge; clarification reactions

Introduction

Among the most important environmental problems of the present day, the issue of protecting natural sources of water supply is of paramount importance. The discharging of raw and insufficiently treated wastewater in the surface water reservoirs constantly worsens their condition; these sources of pollution, as a rule, contain compounds of nitrogen and phosphorus. Therefore, deep purification of wastewater is one of the most important problems for today.

The accumulated experience and scientific research of many generations of specialists prove the priority of biological methods of purification. Today, the majority of wastewater, which is discharged in a centralized way, is cleared at aeration

stations in aerotanks [1, 2, 4, 5, 12]. However, the existing conventional biological purification technology is characterized by inadequate efficiency (especially for the removal of phosphorus compounds) and is not always able to meet the set norms [3, 7, 14, 16, 19, 23].

Therefore, in wastewater treatment plants, where biological treatment of effluent is carried out according to the traditional scheme, the important practical tasks are the issues of improvement of existing technologies of wastewater treatment on the basis of these structures, increase of their efficiency.

In general, the following solutions are used to improve the efficiency of aerotanks: the creation of sites with aerobic and anaerobic conditions of oxi-

ation [2, 13, 21], the use of uneven dispersed effluent intake [2], the supply of technical oxygen [2, 15], the addition of reagent preparations [2, 15], etc. It is clear that the improvement of structures and technologies is delayed by economic factors. Also currently, the widely used effluent clarification method has become the process of simultaneous removal of organic pollutants (OP) and nitrogen by suspended and attached biocenosis [20, 22]. By their activity immobilized biocenosis considerably exceed the oxidation capacity of suspended active sludge.

In this case, the loading elements (nozzles, screens, etc.) can be located throughout the volume of the aerotanks or more densely and compactly only in its individual sections.

However, the possibility of evaluating the efficiency of aerotank due to add-on elements with attached biocenosis (biofilm) requires more complete and advanced mathematical models. Models that will take into account the processes of simultaneous oxidation of OP by suspended and attached biocenosis will allow to reasonably estimate the influence of various factors of purification in aerotanks. These processes are associated with the formation of a biofilm of different thickness and structure on the surface of the additional loading (screen) in the aerotank volume [13, 21].

The parameters of wastewater treatment, determined by numerical methods, taking into account the influence of various purification factors will give an opportunity to obtain reliable results. Based on the results obtained, it is possible to evaluate the effectiveness of the aerotanks through the introduction of additional elements with the attached biocenosis (biofilm).

Purpose

The main purpose is to carry out calculations and obtain a comparative assessment of the efficiency of complete-mix aerotanks and continuous-flow aeration tanks. Herewith wastewater is treated due to the additional arrangement in their volume of loading with the attached biocenosis (biomass) in the form of a biofilm with a high concentration of microorganisms.

To achieve this purpose, the following tasks need to be addressed:

– Provide calculation dependencies and mathematical models that allow estimating the influence

of various factors on the simultaneous removal of organic pollutants (OP) with suspended and attached biocenosis in aerotanks of various structures, namely in complete-mix aerotanks and continuous-flow aeration tanks;

– On the basis of the proposed models and methods of calculation, to conduct an analysis and evaluation of the influence of the main factors, to identify the parameters of supply of the required amount of oxygen to the place of reaction and the disposal of OP;

– To consider the specific examples for different process flow schemes of the location of the attached biomass reactor and to provide comparative results of studies of simultaneous OP purification;

– To substantiate the increased efficiency of effluent clarification due to the arrangement of the attached biocenosis in the volume of the aerotanks.

Methodology

Mathematical models were constructed and methods for calculating the parameters of purification [6, 7, 11, 17, 18] were developed for the estimation and analysis of the simultaneous removal of organic pollutants (OP) with suspended and attached biocenosis in aerotanks of various structures. In this case, for various hydrodynamic schemes of aerotanks, namely complete-mix aerotanks and continuous-flow aeration tanks. The specific examples showed and substantiated a significant increase in the efficiency of purification due to the add-on attached biocenosis.

First, let us consider the most advisable from the practical point of view technological scheme of a complete-mix aerotank, which consists of two parts (reactors 1 and 2) [7]. In reactor 1, the OP is removed only due to the suspended biocenosis (active sludge), that is, it works as an ordinary complete-mix aerotank. In the second part (reactor 2), the OP removal occurs mainly by the attached biocenosis, which is formed at the add-on load, with the possible consideration, if necessary, of the action of the active sludge in the reactor 2. It is believed that the biochemical oxidation process is adequately provided with oxygen, that is, the flow of oxygen will not limit the kinetics of oxidation of both the suspended and attached biocenosis. Let us consider also the most widespread case in which the removal of OP by an active sludge occurs by

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

a zero-order reaction, and in a biofilm – by the first-order reaction. Then, according to [7], to determine the concentration of OP at the output from the 2nd reactor (of the aerotank) L_{a2} , the following general dependence is proposed

$$L_{a2} = \frac{L_0 - T_{a1} w_{a1} - T_{a2} w_{a2}}{1 + \frac{F_{a2}}{Q_a} K_L (1 - A)}, \quad (1)$$

where

$$w_a = \frac{\mu_{ma} X_a}{Y_a}, \quad T_{a1} = \frac{W_{a1}}{Q_a},$$

$$T_{a2} = \frac{W_{p2}}{Q_a} = \frac{\varepsilon W_{\delta_2}}{Q_a}, \quad T_a = T_{a1} + T_{a2}. \quad (2)$$

For the 1st reactor, the volume of the liquid is assumed to be equal to the reactor volume $W_{p1} = W_{a1}$. For reactor 2 it is necessary to take into account the volume loaded with biofilm W_{δ_2} , therefore we have

$$W_{p2} = \varepsilon W_{a2}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{W_{\delta_2}}{W_{a2}}. \quad (3)$$

The specific loading area with the biofilm in the reactor 2 is determined by the formula

$$F_{\delta_2} = \frac{F_{\delta_2}}{W_{a2}}, \quad (4)$$

where F_{δ_2} is the total surface area of loading (biofilm) in reactor 2 of volume W_{a2} .

Recommendations for determining the parameter $A = \frac{L_{\delta_2}}{L_{a2}}$ under the assumption that the reaction

rate in the biofilm is taken of the first order, are given in the papers [7, 9]. Here L_{a2} and L_{δ_2} are the concentrations of OP in the reactor 2 and on the surface of the biofilm.

For further analysis, the dependence is represented in the form

$$\frac{L_{a2}}{L_0} = \frac{1 - \tau}{1 + \gamma}, \quad (5)$$

where

$$\tau = \frac{T_a w_a}{L_0}, \quad \gamma = \frac{F_{a2}}{Q} K_L (1 - A). \quad (6)$$

Fig. 1 shows the graphs of the function $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\tau, \gamma)$, constructed according to the dependence (5). It is assumed that the volumes of the first and second reactors coincide $W_{a1} = W_{a2}$ and that $w_{a1} \approx w_{a2} = w_a$. The results presented in Fig. 1 show that post-treatment by the attached biomass can significantly improve the quality of wastewater treatment. However, as shown by Fig. 2, with the increase of the parameter γ , which depends on the flow N and mainly on the specific loading area F_{δ_1} , that is, on the load element density, this improvement is significantly slowed down. Therefore, in this case, as in other process flow schemes of aerotanks with attached biocenosis, an important issue is the choice of the most appropriate loading area F_{δ} based on the additional analysis.

Fig. 3 shows the graphs of the function $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\tau, \gamma)$, constructed under the condition that the clarification in the second reactor due to the suspended biocenosis (active sludge) can be neglected, i.e. $T_{a2} = 0$ ($\tau = T_{a1}$).

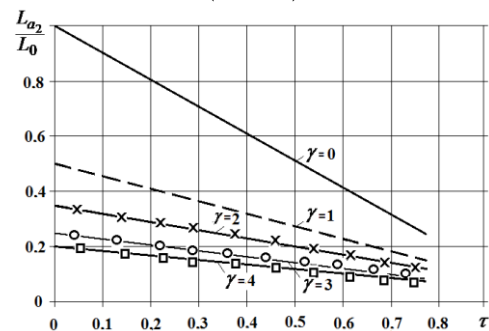


Fig. 1 Dependency graph $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\tau, \gamma)$

As can be seen from the data in Fig. 1 and Fig. 3 the active sludge in the second reactor with the same values of the parameter τ does not significantly affect the overall clarification effect. However, clarification in the free volume of the 2nd reactor allows for some increase in the value of the

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

parameter τ , and, accordingly, the quality of the removal of organic pollutants.

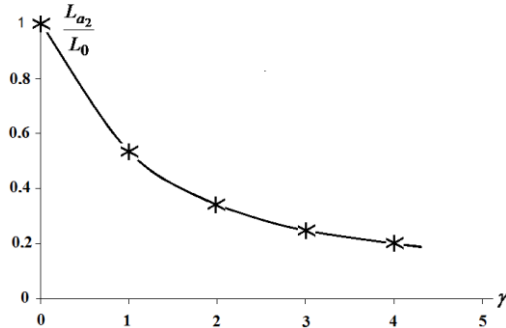


Fig. 2. Dependency graph $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\gamma)$ with $\tau = 0$

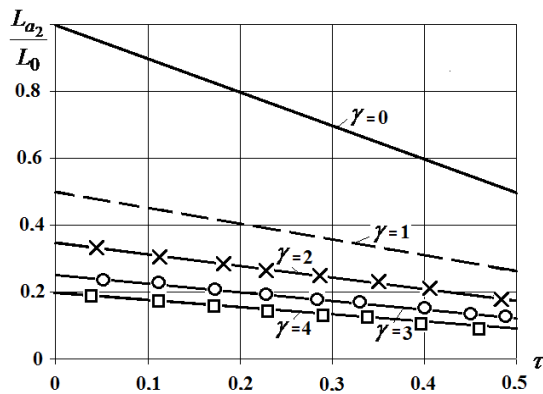


Fig. 3. Dependency graph $\frac{L_{a2}}{L_0} = f(\tau, \gamma)$

The paper [10 (Fig. 2, 3)] presents the comparative results of the studies of simultaneous OP clarification in complete-mix aerotank, in which the elements of additional loading are evenly arranged. When constructing these graphs, the dependence (5) is used, in which the parameters τ and γ are taken in accordance with the adopted process flow scheme of the complete-mix aerotank, namely:

$$\tau = \frac{T_a w_a}{L_0}, \quad \gamma = \frac{F_{\delta}}{Q_a} K_L (1 - A),$$

$$T_a = \frac{W_{pa}}{Q_a}, \quad W_{pa} = \varepsilon W_a. \quad (7)$$

$F_{\delta 1}$ is the total area of loading elements in the complete-mix aerotank with length l and volume W_{al} . According to [10 (Fig. 2, 3)], only at significant values of the parameter τ and minor values of γ one should also take into account the removal of OP due to the active sludge.

The obtained dependencies and performed calculations allow substantiating the increase in efficiency of the aerotank using the arrangement of loading elements with the attached biocenosis in the second half of its volume.

The works [7, 10] present theoretical studies and methods for calculating the parameters of biological wastewater treatment from organic pollutants (OP) in continuous-flow aeration tanks with simultaneous purification of suspended and attached biocenosis. To evaluate the efficiency of such aerotanks, let us consider the scheme of their work with the suspended and attached biocenosis when the loading elements (nozzles, screens, etc.) are evenly spaced along the entire length l [10].

As a result of the theoretical studies carried out under the condition that the removal of the OP by the suspended and attached biocenosis occurs by the first-order reaction, the following dependence is obtained to determine the change in the concentration of L_a along the aerotank X

$$L_a(X) = L_0 \tilde{x} = e^{-B\tilde{x}} \quad (8)$$

$$\tilde{x} = (A_* + k_{a*})x = B\bar{x}, \quad B = (A_* + k_{a*})l, \quad \bar{x} = \frac{x}{l}, \quad (9)$$

where

$$A_* = \frac{\lambda_0}{V} (1 - A), \quad k_{a*} = \frac{k_a}{V}, \quad \lambda_0 = \frac{F_{\delta}}{F_a} K_L,$$

$$k_a = \frac{\mu_{ma} X_a}{K_{ma} Y_a}, \quad V = \frac{Q_a}{F_a}$$

$F_{\delta} = F_{\delta l}$ is the loading surface area (biofilm) per unit length of aerotank l (m), K_L – coefficient of mass transfer in a liquid film (m/h), $A = \frac{F_{\delta}}{L_0}$ is the

biofilm parameter determined according to the recommendations given in the papers [7, 9].

At the exit of the aerotank we have

$$x = l, \quad \bar{x} = 1,$$

$$L_a(l) = L_0 e^{-\tilde{l}} = L_0 e^{-B}, \quad \tilde{l} = B. \quad (10)$$

In order to carry out further analysis and obtain comparative estimates of the influence of various factors on the clarification processes in this case, we represent the dependence (10) in the form

$$\frac{L_a(l)}{L_0} = e^{-(B_L+B_a)}, \quad (11)$$

where $B_L = lA_*$, $B_a = lk_{a*}$.

Thus, at $B_L = 0$ the removal of OP in aerotanks occurs only at the expense of suspended biocenosis (active sludge), and at $B_a = 0$ – only at the expense of the attached biocenosis (biofilm).

Based on the dependence (11), we built the calculated graphs $\frac{L_a(l)}{L_0} = f(B_L, B_a)$, presented in work [8 (Fig. 3)] and in Fig. 4

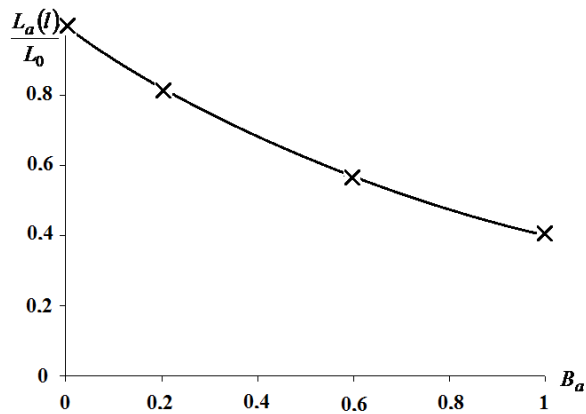


Fig. 4. Dependence graph $\frac{L_a(l)}{L_0} = f(B_a)$
with $B_L = 0$

The results of the calculations presented in [8 (Fig. 3)] and in Fig. 4 show that the additional introduction into the aerotank of loading with the attached biocenosis (biofilm) allows to significantly improve the work of the continuous-flow aeration tank, especially with $B_L < 1$.

The work [13] presents an experimental evaluation of the efficiency (EF) of the complete-mix aerotank due to add-on plastic screens, the results of which at $Q_a = 110 \text{ ml/min}$, $L_0 = 150 \frac{\text{mgBOD}_5}{l}$ are given in Table 1.

The Table 1 shows a significant increase in EF, a decrease in L_a when using 6 screens and a gradual increase in efficiency with increasing number of screens. In this case, the total increase in efficiency is 25%. As noted earlier in Fig. 2, 3 and in [10 (Fig. 2)], the intensity of the increase in efficiency is stabilized upon achievement of the minimum concentration of pollutants at the output L_a .

Table 1

Experimental EF evaluation of OP removal in aerotank

Loading	Relative EF in%	Total EF in%	Intensity of EF in%,	L_a , mg/l at the output
0 screens	0	72.50	–	44
6 screens	25	90.00	17.50	16
12 screens	50	95.00	22.50	8
18 screens	75	96.50	23.75	6
24 screens	100	97.50	25.00	4

Findings

The comparative calculations on the presented dependencies make it possible to estimate the intensity of increasing the clarification efficiency in aerotanks due to additional elements with attached biocenosis. The constructed models take into account the special features of the intake of organic pollutants and oxygen in a biofilm, its parameters, as well as the velocity of kinetic reactions with the simultaneous removal of organic contamination by suspended and attached biocenosis.

Implementation of the calculation methods for the proposed dependencies allows more fully and reasonably to consider the important processes of wastewater treatment, which occur with the additional involvement of the attached biocenosis. These processes significantly affect both the disposal of OP and the efficiency of aerotanks.

Originality and practical value

As part of the study described in this article, it is proposed to increase the efficiency of the aerotanks by allotting its part for additional loading with attached biocenosis. In this part there is simultaneous oxidation of organic pollutants with active sludge and biofilm. The mathematical model describing this process is presented. There are carried out calculations, performed comparative evaluation of the unit efficiency, depending on the degree of influence of the additional loading. Such an evaluation allows us to justify the rational parameters of the biological treatment unit of improved design. This means that the obtained scientific result in the form of the results of calculations based

on the mathematical model of biological oxidation of organic pollutants by suspended and attached biocenosis, including an assessment of the influence of these components on the purification efficiency, is interesting from a theoretical point of view. From the practical point of view, the conducted researches allow to justify the use of additional loading with attached microorganisms in order to improve the quality of removal of organic pollutants in aerotanks.

Conclusions

The results obtained in the article give grounds for asserting the possibility of introducing into the actual technological process of wastewater treatment the use of attached biocenosis in aerotanks, which will allow getting effluent at the output from the facilities with a concentration of organic substances within the permissible values.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та розрахунки : навч. посіб. / О. А. Василенко, С. М. Епоян, Г. М. Смірнова [та ін.]. – Київ : КНУБА ; Харків : ХНУБА : Ексклюзив, 2012. – 538 с.
2. Воронов, Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод : учебник для вузов / Ю. В. Воронов. – Москва : АСВ, 2009. – 760 с.
3. ДБН В.2.5-75-2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 128 с.
4. Дослідження процесів очищення стічних вод від біогенних елементів та утилізації енергетичного потенціалу стічних вод : монографія / О. О. Грицина, М. А. Єсін, В. С. Жукова [та ін.]. – Рівне : Нац. ун-т водн. госп-ва та природокористування, 2018. – 268 с.
5. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – Москва : АКВАРОС, 2003. – 507 с.
6. Моделювання ефективності роботи станції біологічного очищення стічних вод / О. О. Шевченко, В. А. Крупко, Л. М. Клінцов, І. М. Іванова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5/10 (71). – С. 16–20.
7. Олійник О. Я. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аэротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Доповіді НАН України. – 2015. – № 5. – С. 55–60. doi: <http://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
8. Олійник, О. Я. Підвищення ефективності роботи аэротенків-витискувачів за рахунок завислого і зваженого біоценозу / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки : наук.-техн. зб. – Київ, 2016. – Вип. 26. – С. 123–130.
9. Олійник, О. Я. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах / О. Я. Олійник, О. А. Колпакова // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук.-техн. пр. – Київ, 2014. – Вип. 16. – С. 68–86.
10. Олейник, А. Я. Повышение эффективности работы аэротенков / А. Я. Олейник, Т. С. Айрапетян // Вісн. Одес. держ. акад. буд-ва та архітектури : зб. наук. пр. – Одеса, 2015. – Вип. 59. – С. 216–224.
11. Biliaev, M. M. Modeling of biological wastewater treatment on the basis of quick-computing numerical model / M. M. Biliaev, M. V. Lemesh // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 1 (73). – С. 15–23. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/124882>
12. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design / M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama, D. Brdjanovic. – London : IWA Publishing, 2008. – 511 p.
13. Gebara, F. Activated sludge biofilm waste water treatment system / F. Gebara // Water Research. – 1999. – Vol. 33. – Iss. 1. – P. 230–238. doi: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(98\)00210-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(98)00210-3)
14. Improving a compact biofilm reactor to realize efficient nitrogen removal performance: step-feed, intermittent aeration, and immobilization technique / M. Zeng, J. Hu, D. Wang [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – Vol. 25. – Iss. 7. – P. 6240–6250. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0935-9>
15. Marzec, M. Reliability of removal of selected pollutants in different technological solutions of household wastewater treatment plants / M. Marzec // Journal of Water and Land Development. – 2017. – Vol. 35. – Iss. 1. – P. 141–148. doi: <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0078>

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

16. Plant-wide model-based analysis of iron dosage strategies for chemical phosphorus removal in wastewater treatment systems / C. Kazadi Mbamba, E. Lindblom, X. Flores-Alsina [et al.] // *Water Research*. – 2019. – Vol. 155. – P. 12–25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.048>
17. Revilla, M. Analysis of simulation tools and optimization of the operational conditions for biofilm activated sludge industrial process / M. Revilla, B. Galán, J. R. Viguri // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2018. – Vol. 15. – Iss. 12. – P. 2499–2510. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1626-2>
18. Shamsutdinova, Z. R. Analysis of the aerotanks efficiency in wastewater treatment system / Z. R. Shamsutdinova, I. I. Khafizov // *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. – 2016. – Iss. 4. – P. 245–249. doi: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-245-249>
19. Shreve, M. J. Trace organic contaminant removal in six full-scale integrated fixed-film activated sludge (IFAS) systems treating municipal wastewater / M. J. Shreve, R. A. Brennan // *Water Research*. – 2019. – Vol. 151. – P. 318–331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.042>
20. Groundwater share quantification through flood hydrographs simulation using two temporal rainfall distributions / K. S. Balkhair, A. Masood, M. Almazroui [et al.] // *Desalination and Water Treatment*. – 2018. – Vol. 114. – P. 109–119. doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22346>
21. The development of simultaneous partial nitrification, ANAMOX and denitrification process in a single reactor for nitrogen removal / H. Chen, S. Liu, F. Yang, Y. Xue, T. Wang // *Bioresource Technology*. – 2009. – Vol. 100. – Iss. 4. – P. 1548–1554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.003>
22. The transformation of nitrogen and phosphorus compounds during biological treatment at the Minsk treatment plant / R. M. Markevich, M. V. Rymovskaya, I. A. Grebenchikova, E. A. Flyurik, I. P. Dziuba // *Biotechnology and the Ecology of Big Cities* / Edited by S. D. Varfolomeev, G. E. Zaikov, L. P. Krylova. – Minsk : Nova Science Publishers, 2011. – P. 53–60.
23. Von Sperling, M. *Biological wastewater treatment series. Vol. 5 : Activated sludge and aerobic biofilm reactors* / M. Von Sperling. – London : IWA Publishing, 2007. – 340 p.

О. Я. ОЛІЙНИК¹, Т. С. АЙРАПЕТЯН^{2*}, С. М. КУРГАНСЬКА³

¹Відділ прикладної гідродинаміки, Інститут гідромеханіки НАН України, вул. Желябова, 8/4, Київ, Україна, 03057, тел. +38 (050) 559 72 89, +38 (044) 459 65 10, ел. пошта Oleynik2019AI@gmail.com, ORCID 0000-0002-9110-1709

²Каф «Водопостачання, водовідведення і очищення вод», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 33 40, +38 (057) 707 31 06, ел. пошта Tamara.Ayrapetyan@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-8834-5622

³Відділ прикладної гідродинаміки, Інститут гідромеханіки НАН України, вул. Желябова, 8/4, Київ, Україна, 03057, тел. +38 (063) 917 87 84, ел. пошта kurganska@ukr.net, ORCID 0000-0002-7593-6458

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АЕРОТЕНКІВ ЗА РАХУНОК ДОДАТКОВОГО ВЛАШТУВАННЯ ЗАКРІПЛЕНОГО БІОЦЕНОЗУ

Мета. Дослідження передбачає виконання порівняльних розрахунків для оцінки ефективності роботи аеротенків із додатковим закріпленням біоценозом (біоплівкою). **Методика.** Для підвищення ефективності роботи аеротенків за рахунок упровадження додаткового завантаження із закріпленням біоценозом (біоплівкою) побудовано математичні моделі, що враховують одночасне окислення органічних забруднень завислим і закріпленням біоценозом. На основі цих моделей розроблено методи розрахунку параметрів очищення. З'ясовано вплив різних факторів на очищення в аеротенках, установлено, що інтенсивність очищення підвищується за рахунок додаткових елементів із закріпленням біоценозом. При цьому розглянуто можливі технологічні й конструктивні схеми аеротенків, коли елементи завантаження (насадки, сітки тощо) розташовані по всьому їх об'єму або більш щільно й компактно тільки на окремих ділянках. **Результати.** Визначені за допомогою чисельних методів параметри очищення стічних вод від органічних забруднень і побудовані графіки показують значну ефективність роботи аеротенків за рахунок упровадження додаткового завантаження із закріпленням біоценозом (біоплівкою). Виконані розрахунки впливу додаткового завантаження на ефективність роботи аеротенків-змішувачів та аеротенків-витискувачів показали, що використання іммобілізованого біоценозу дозволяє підвищити якість видалення органічних забруднень у 2–5 разів.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Наукова новизна. Науково обґрунтовано вплив різних факторів на очищення стічних вод в аеротенках, ефективність якого підвищується за рахунок додаткових елементів із закріпленим біоценозом.

Практична значимість. У разі впровадження результатів досліджень на підприємствах з очистки стічних вод може бути значно підвищена якість видалення органічних забруднень біологічними методами. Реалізація методів розрахунку за запропонованими залежностями дозволяє більш повно й обґрунтовано врахувати важливі процеси, які значно впливають на утилізацію органічних забруднень та ефективність роботи аеротенків із додатковим залученням для очищення стічних вод закріпленого біоценозу.

Ключові слова: аеротенки-реактори; закріплений біоценоз (біомаса); біоплівка; активний мул; реакції очищення

А. Я. ОЛЕЙНИК¹, Т. С. АЙРАПЕТЯН², С. Н. КУРГАНСКАЯ³

¹Отдел прикладной гидродинамики, Институт гидромеханики НАН Украины, ул. Желябова, 8/4, Киев, Украина, 03057, tel. +38 (050) 559 72 89, тел. +38 (044) 459 65 10, эл. почта Oleynik2019Al@gmail.com, ORCID 0000-0002-9110-1709

²Каф. «Водоснабжение, водоотведение и очистка вод», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 707 33 40, +38 (057) 707 31 06, эл. почта Tamara.Ayrapetyan@kname.edu.ua, ORCID 0000-0002-8834-5622

³Отдел прикладной гидродинамики, Институт гидромеханики НАН Украины, ул. Желябова, 8/4, Киев, Украина, 03057, тел. +38 (063) 917 87 84, эл. почта kurganska@ukr.net, ORCID 0000-0002-7593-6458

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЭРОТЕНКОВ ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПРИКРЕПЛЕННОГО БИОЦЕНОЗА

Цель. Исследование предусматривает выполнение сравнительных расчетов для оценки эффективности работы аэротенков с дополнительным прикрепленным биоценозом (био пленкой). **Методика.** Для повышения эффективности работы аэротенков за счет внедрения дополнительной загрузки с прикрепленным биоценозом (био пленкой) построены математические модели, которые учитывают одновременное окисление органических загрязнений взвешенным и прикрепленным биоценозом. На основе этих моделей разработаны методы расчета параметров очистки. Определено влияние различных факторов на очистку в аэротенках, установлено, что интенсивность очистки повышается за счет дополнительных элементов с прикрепленным биоценозом. При этом рассмотрены возможные технологические и конструктивные схемы аэротенков, когда элементы загрузки (насадки, сетки и т. п.) расположены по всему их объему или более плотно и компактно только на отдельных участках. **Результаты.** Определенные с помощью численных методов параметры очистки сточных вод от органических загрязнений и построенные графики показывают значительную эффективность работы аэротенков за счет внедрения дополнительной загрузки с прикрепленным биоценозом (био пленкой). Выполненные расчеты влияния дополнительной загрузки на эффективность работы аэротенков-смесителей и аэротенков-вытеснителей показали, что использование иммобилизованного биоценоза позволяет повысить качество удаления органических загрязнений в 2–5 раз.

Научная новизна. Научно обосновано влияние различных факторов на очистку сточных вод в аэротенках, эффективность которой повышается за счет дополнительных элементов с прикрепленным биоценозом.

Практическая значимость. При внедрении результатов исследований на предприятиях по очистке сточных вод может быть значительно повышено качество удаления органических загрязнений биологическими методами. Реализация методов расчета по предложенным зависимостям позволяет более полно и обоснованно учесть важные процессы, которые значительно влияют на утилизацию органических загрязнений и эффективность работы аэротенков с дополнительным привлечением для очистки сточных вод прикрепленного биоценоза.

Ключевые слова: аэротенки-реакторы; прикрепленный биоценоз (биомасса); био пленка; активный ил; реакции очистки

REFERENCES

1. Vasylenko, O. A., Epoian, C. M., Smirnova, H. M., Korinko, I. V., Vasylenko, L. O., & Airapetian, T. S. (2012). *Vodovidvedennia ta ochystka stichnykh vod mista. Kursove i dyplomne proektuvannia. Pryklady ta rozrakhunky: Navchalnyi posibnyk*. Kyiv: KNUBA; Kharkiv: KhNUBA; Ekskliuzyv. (in Ukrainian)
2. Voronov, Y. V. (2009). *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: ASV. (in Russian)
3. Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia, 128 DBN V.2.5-75-2013 (2013). (in Ukrainian)
4. Hrytsyna, O. O., Yesin, M. A., Zhukova, V. S., Bliashyna, M. V., & Voloshchuk, V. A. (2018). *Doslidzhennia protsesiv ochyshchennia stichnykh vod vid biohennykh elementiv ta utylizatsii enerhetychnoho potentsialu stichnykh vod: Monohrafiia*. Rivne: Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. (in Ukrainian)
5. Zhmur, N. S. (2003). *Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na so- oruzheniyakh s aerotenkami*. Moscow: AKVAROS. (in Russian)
6. Shevchenko, O. O., Krupko, V. A., Klintsov, L. M., & Ivanova, I. M. (2014). Modeliuvannia efektyvnosti roboty stantsii biolohichnoho ochyshchennia stichnykh vod. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/10(71), 16-20. (in Ukrainian)
7. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of the Sciences of the Ukraine*, 5, 55-60. doi: <http://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
8. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2016). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty aerotenkiv-vytyskuvachiv za rakhunok zavysloho i zvazhenoho biotsenozu. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki*, 26, 123-130. (in Ukrainian)
9. Oleynik, A. Y., & Kolpakova, O. A. (2014). Modelling and calculation of bioilgical wastewater treatment to trickling biofilters. *Environmental safety and natural resources*, 16, 68-86. (in Ukrainian)
10. Oleynik, A. Y., & Ayrapetyan, T. S. (2015). Povyshenie effektivnosti raboty aerotenkov. *Bulletin of Odessa state academy of civil engineering and architecture: collection of scientific works*, 59, 216-224. (in Russian)
11. Biliaiev, M. M., & Lemesh, M. V. (2018). Modeling of biological wastewater treatment on the basis of quick-computing numerical model. *Science and Transport Progress*, 1(73), 15-23. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/124882> (in English)
12. Henze, M., Van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. London: IWA Publishing. (in English)
13. Gebara, F. (1999). Activated sludge biofilm wastewater treatment system. *Water Research*, 33(1), 230-238. doi: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(98\)00210-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(98)00210-3) (in English)
14. Zeng, M., Hu, J., Wang, D., Wang, H., Wang, Y., Wu, N., ... Wang, C. (2017). Improving a compact biofilm reactor to realize efficient nitrogen removal performance: step-feed, intermittent aeration, and immobilization technique. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(7), 6240-6250. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0935-9> (in English)
15. Marzec, M. (2017). Reliability of removal of selected pollutants in different technological solutions of household wastewater treatment plants. *Journal of Water and Land Development*, 35(1), 141-148. doi: <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0078> (in English)
16. Kazadi Mbamba, C., Lindblom, E., Flores-Alsina, X., Tait, S., Anderson, S., Saagi, R., ... Jeppsson, U. (2019). Plant-wide model-based analysis of iron dosage strategies for chemical phosphorus removal in wastewater treatment systems. *Water Research*, 155, 12-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.048> (in English)
17. Revilla, M., Galán, B., & Viguri, J. R. (2017). Analysis of simulation tools and optimization of the operational conditions for biofilm activated sludge industrial process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(12), 2499-2510. doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1626-2> (in English)
18. Shamsutdinova, Z. R., & Khafizov, I. I. (2016). Analysis of the aerotanks efficiency in wastewater treatment system. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 4, 245-249. doi: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-245-249> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

19. Shreve, M. J., & Brennan, R. A. (2019). Trace organic contaminant removal in six full-scale integrated fixed-film activated sludge (IFAS) systems treating municipal wastewater. *Water Research*, *151*, 318-331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.042> (in English)
20. Balkhair, K. S., Masood, A., Almazroui, M., Rahman, K. U., Bamaga, O. A., Kamis, A. S., ... Hesham, K. (2018). Groundwater share quantification through flood hydrographs simulation using two temporal rainfall distributions. *Desalination and Water Treatment*, *114*, 109-119. doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22346> (in English)
21. Chen, H., Liu, S., Yang, F., Xue, Y., & Wang, T. (2009). The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal. *Bioresource Technology*, *100*(4), 1548-1554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.003> (in English)
22. Markevich, R. M., Rymovskaya, M. V., Grebenchikova, I. A., Flyurik, E. A., & Dziuba, I. P. (2011). The transformation of nitrogen and phosphorus compounds during biological treatment at the Minsk treatment plant. In S. D. Varfolomeev, G. E. Zaikov, L. P. Krylova (Eds.), *Biotechnology and the Ecology of Big Cities*. Minsk: Nova Science Publishers. (in English)
23. Von Sperling, M. (2007). *Biological wastewater treatment series. Vol. 5: Activated sludge and aerobic biofilm reactors*. London: IWA Publishing. (in English)

Received: March 22, 2019

Accepted: July 15, 2019

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.212:629.4.048

Д. Н. КОЗАЧЕНКО^{1*}, Ю. Н. ГЕРМАНЮК^{2*}, Э. К. МАНАФОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта kozachenko@upr.dnift.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}Каф. «Транспортные технологии», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, тел. +30 (032) 267 99 74, эл. почта yuhermanyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

^{3*}Каф. «Эксплуатация железнодорожного транспорта», Азербайджанский технический университет, пр. Г. Джавида, 25, Баку, Азербайджан, AZ 1073, тел. +994 (55) 741 79 39, эл. почта elshan_manafov@mail.ru, ORCID 0000-0001-5697-577X

ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ НА ОСНОВании СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Цель. В данной статье авторы предполагают разработать статистические методы контроля технологических процессов работы железнодорожных станций на основании контрольных карт Шухарта. **Методика.** Исследования в статье выполнены на основании методов статистического контроля качества и теории эксплуатации железных дорог. **Результаты.** Существующие методы контроля выполнения технологических процессов железнодорожных станций ориентированы на достижение количественных показателей их работы при безусловном выполнении необходимого перечня технологических операций и соблюдения требований безопасности движения поездов. В то же время проблема контроля соблюдения качественных показателей работы станций требует дополнительных исследований. Основным критерием для оценки качества выполнения технологических процессов, связанных с обработкой поездов, локомотивов, вагонов, контейнеров, грузов, документов и информации на железнодорожных станциях является их продолжительность. Учитывая то, что затраты времени на обработку указанных объектов являются случайными величинами, для контроля и управления технологическими процессами станций предложено использовать статистические методы, в частности карты Шухарта. В качестве примера в статье рассмотрены процессы технического обслуживания вагонов грузовых поездов по отправлению и построены карты Шухарта для станций Клепаров и Баладжары. Анализ работы обеих станций показал наличие существенного влияния местных условий на продолжительность технического обслуживания составов поездов по отправлению, а также значительные отклонения между его нормативной и фактической продолжительностью. **Научная новизна.** В данной работе впервые предложен метод управления технологическими процессами железнодорожных станций, основанный на использовании контрольных карт Шухарта. **Практическая значимость.** Применение предложенного метода позволяет, с одной стороны, адекватно выполнять контроль продолжительности технологических процессов и отдельных технологических операций, представляющих собой, как правило, случайные величины, а с другой – оценивать возможность реализации установленных технологическими процессами норм. Кроме того, организация накопления статистической информации о ходе выполнения технологических процессов также позволит существенно упростить построение адекватных имитационных моделей, учитывающих стохастичный характер функционирования железнодорожных станций.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; железнодорожная станция; технологический процесс; статистический контроль качества; карты Шухарта

Введение

Железнодорожный транспорт является одним из основных видов наземного транспорта. Его отличительные характеристики – высокая провозная способность, низкие удельные расходы энергии на перемещение пассажиров и грузов, а также высокая безопасность перевозок. При этом одним из основных методов обеспечения установленных сроков доставки, экономичности и безопасности перевозок на железнодорожном транспорте является предварительная разработка прогрессивных технологических процессов линейных подразделений, в частности железнодорожных станций. Нарушение технологических процессов железнодорожных станций может повлечь за собой экономический ущерб, а в отдельных случаях ущерб окружающей среде, здоровью и жизни людей [4]. В этой связи проблема совершенствования методов управления технологическими процессами железнодорожных станций является актуальной.

Нужно отметить, что само понятие технологического процесса железнодорожной станции требует уточнения. Так, в [13] технологический процесс определен как нормативный документ, в котором изложена система организации работы станции, основанная на применении передовых методов труда, последовательности и норм времени на выполнение технологических операций по приёму, отправлению и обработке поездов и вагонов всех категорий при безусловном обеспечении безопасности движения, сохранности перевозимых грузов, соблюдении требований охраны труда и окружающей природной среды. В [12] определение технологического процесса работы станции отсутствует, но указано, что технологические процессы должны регламентировать все выполняемые конкретной станцией технологические операции независимо от их частоты и объёмов. Таким образом, на железнодорожном транспорте сложилась ситуация, когда в качестве технологического процесса рассматривают нормативный документ, в котором этот процесс должен быть представлен без раскрытия его сути. В соответствии с таким определением понятия «технологический процесс станции» на железнодорожном транспорте сформировалось поня-

тие управления и контроля технологических процессов их работы.

В [13] задача контроля выполнения технологических процессов железнодорожных станций сводится к контролю выполнения плановых показателей эксплуатационной работы, а также к контролю за соблюдением установленного технологическим процессом порядка выполнения поездной и маневровой работы, графика исполненной работы станции, соответствующих журналов учета работы станции в соответствии с требованиями форм первичной учетной документации по хозяйству перевозок и инструктивных указаний по их составлению и ведению, а также к принятию оперативных мер по недопущению нарушений установленной технологии.

В [12] указано на необходимости контроля технических средств станции, а также необходимости проведения соответствующих мероприятий при превышении рационального уровня их загрузки. Такой подход к контролю и управлению технологическими процессами железнодорожных станций имеет два существенных недостатка. Во-первых, одним из основных показателей качества работы транспорта является срок доставки. Железнодорожный транспорт станции оказывает решающее влияние на данный показатель, так как вагон находится в процессе движения лишь около 10 % продолжительности своего оборота, а 90 % – на железнодорожных станциях и примыкающих к ним подъездных путях. В то же время контроль затрат времени на технологические процессы на станциях осуществляют лишь путем оценки математического ожидания величины простоя вагонов, безотносительно к каждой отдельной перевозке.

Во-вторых, для существующего подхода характерен значительный уровень субъективизма, как при установлении плановых показателей, так и при оценке результатов работы станций. В-третьих, существующие методы решений по изменению технологии, технического оснащения и путевого развития железнодорожных станций базируются на методах графического, графоаналитического и имитационного моделирования [3, 6, 11, 18].

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Исследования, выполненные в [10], показывают, что замена модели функционирования станции со случайной продолжительностью технологических операций на математическую модель с постоянной продолжительностью операций приводит к существенной погрешности результатов оценивания. Отсутствие данных о параметрах распределений случайных величин продолжительности выполнения технологических операций на станциях приводит к необходимости выполнения этапа обследования станций [9], что усложняет процесс оценки.

Определение понятия «технологический процесс» есть в нормативных документах, регламентирующих промышленное производство. ГОСТ 3.1109-82 [7] для области изготовления и ремонта изделий машино- и приборостроения определяет понятие технологического процесса как часть производственного, содержащего целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда.

В научной литературе понятие «технологический процесс» имеет значительное количество разнообразных определений. В частности, в [19] его определяют как основную часть производственного процесса, которая напрямую связана с изменением формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств заготовки. Отмечено, что технологический процесс – это дискретный процесс, в котором состояние изготавливаемого элемента изменяется постепенно и обычно необратимо. В работе [21] технологический процесс рассматривают как часть производственного, которая связана с обработкой на рабочих местах производства отдельных продуктов. Отмечено, что технологические процессы происходят в рамках технологических систем и состоят в преобразовании входных элементов в искомую форму. Технологический процесс представляет собой совокупность технологических операций с целью превращения низшей ценности в высшую посредством действий человека. Он косвенно связан с элементами производства при их взаимном действии на отдельных производственных рабочих местах и содержит: методы работы на рабочем месте, режим работы, время и сложность работы, которую используют для производства продукта.

Нужно отметить, что объектами труда на железнодорожных станциях, как правило, является не сырье, а поезда, вагоны и локомотивы, грузы, документы и информация. В этой связи рассмотрим ряд более общих определений. Так, например, в [6] технологический процесс определен как процесс перевода предметов труда из одного состояния в другое посредством влияния внутренней среды производственно-технической системы на предмет труда через технологическое оборудование.

Дискретный и целенаправленный характер технологических процессов подчеркнут в [22]. В соответствии с данной работой технологический процесс – это отлаженная последовательность взаимосвязанных действий, начиная с момента генерации исходных данных до достижения желаемого результата. Технологические процессы состоят из технологических операций, которые, в свою очередь, определяются технологическими переходами. Технологические переходы названы законченной частью технологической операции, осуществляемой с использованием тех же инструментов технологического обеспечения. Другими словами, технологический процесс является частью производственного процесса, который включает в себя целенаправленные действия по изменению состояния предмета труда.

Достаточно общее определение понятия технологического процесса приведено в [26] – это метод работы, используемый в технологиях и состоящий из упорядоченной последовательности шагов, которые необходимо выполнить, чтобы удовлетворить потребность или решить проблему.

В целом выполненный анализ характерных особенностей технологического процесса позволяет выделить, что он является частью производственного процесса предприятий, имеет начало и окончание, а также состоит из определенного числа целенаправленных технологических операций. В этой связи будем считать, что документ «технологический процесс» описывает производственный процесс железнодорожной станции, включающий множество технологических процессов обработки на них поездов, локомотивов, вагонов, контейнеров, грузов, документов и информации. В качестве отдель-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ного технологического процесса можно, например, рассматривать погрузку вагона, формирование состава на сортировочной горке и т. п. Такой подход к определению технологических процессов железнодорожных станций позволяет использовать для управления ими методы, разработанные для управления технологическими процессами в промышленности.

К свойствам любого технологического процесса можно отнести следующие:

- определенность, т. е. степень, в которой фактический процесс соответствует его первоначальному описанию;

- стоимость, т. е. общая стоимость выполнения функций процесса и передачи промежуточных результатов между ними;

- репликация – способность технологического процесса создавать выходные потоки с одинаковыми характеристиками, приближаясь к заданным характеристикам при повторных реализациях;

- управляемость, т. е. степень управления процессом для выполнения заранее поставленных задач;

- эффективность – степень оптимальности использования ресурсов для достижения необходимых результатов.

Фундаментальным свойством технологического процесса является более сложный аналог репликации, а именно стабильность технологического процесса. При этом информация, полученная в результате статистического анализа точности и стабильности технологического процесса, может быть использована в качестве аргумента для регулятора в системе управления с целью синтеза соответствующего управляющего воздействия.

Методы контроля и управления технологическими процессами, которые решают данные проблемы, широко применяют в промышленности. Методической основой данных методов является математическая статистика. Основные статистические методы, которые используют в промышленности, – это выборочные методы контроля, а также методы активного контроля технологических процессов. Выборочные методы в основном применяют при приемочном контроле для проверки соблюдения технических требований, предъявляемых к качеству

изделий [14, 16]. Эти методы не оказывают непосредственного влияния на производство изделий, а выявляют брак уже готовой продукции [1, 8]. Учитывая, что число обслуживаемых объектов на станциях не столь велико, как в промышленности, существенной потребности в использовании выборочных методов контроля для управления ими нет. Активный контроль направлен на обеспечение необходимого качества продукции в самом процессе производства, снижение потерь из-за брака и расходов на контроль.

Одним из широко используемых инструментов статистического управления технологическими процессами является предложенная Уолтером Шухартом контрольная карта [24]. Этот метод основывается на методах проверки статистических гипотез. При этом теория контрольных карт выделяет два вида вариабельности или изменчивости. Первый вид – изменчивость, вызванная случайными причинами (их также называют общими, естественными, внутренними, неконтролируемыми). Эта изменчивость обусловлена набором разнообразных причин, присутствующих постоянно, которые нелегко или невозможно выявить. Предположено, что эти причины формируют внутренне присущую процессу изменчивость. Второй вид вариабельности представляет собой реальное изменение в процессе. Такое изменение может быть следствием некоторых причин, не присущих процессу, которые можно идентифицировать и устранить, по крайней мере теоретически. Процесс находится в статистически управляемом состоянии или просто управляем, если изменчивость вызвана только случайными причинами. Как только этот уровень вариабельности определен, любое отклонение от него считают действием особых причин, которое следует выявить и исключить.

В современных условиях контрольные карты Шухарта широко используются как на промышленных предприятиях для анализа тех или иных производственных процессов, так и в образовании, медицине, сфере услуг, при анализе бизнеса, в государственном управлении и т. п. Детальный обзор научных работ по применению карт Шухарта выполнен Адлером и др. в работе [2]. Порядок использования контроль-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ных карт Шухарта регламентован міжнародним стандартом [20]. Однак в експлуатаційній роботі залізничного транспорту статистичні методи управління технологічними процесами поки не отримали широкого застосування. Даному питанню присвячені окремі роботи, переважно пов'язані з безпекою транспортних процесів. Зокрема, Самсонкін і Петінов у роботі [23] на основі карт Шухарта розробили метод оцінки стану машиністів. Хаммидуліна і Тарасова у роботі [17] карти Шухарта запропонували використовувати для управління ризиками виробничого травматизму на залізничному транспорті.

Таким чином, виконаний аналіз наукових робіт по управлінню технологічними процесами залізничних станцій показує, що дана проблема остаточно не вирішена і потребує додаткових досліджень.

Цель

У цій статті автори передбачають розробити статистичні методи контролю технологічних процесів роботи залізничних станцій на основі контрольних карт Шухарта.

Методика

Для аналізу обрано технологічний процес технічного обслуговування вагонів вантажного поїзда в парку відправлення сортировочної станції. Процес технічного обслуговування поїзда по відправленню заключається в технічному огляді вагонів і усунуванні виявлених несправностей шляхом безотцепного або отцепного ремонту.

Норми [12, 13] вказують на граничну тривалість технічного огляду і ремонту вагонів. Потрібно зазначити, що процес технічного обслуговування поїздів по відправленню піддається впливу значущої кількості факторів, і його тривалість є випадковою величиною. В цих умовах методика контролю відповідності тривалості технічного обслуговування поїздів встановленої нормі залишається незрозумілою, так як ймовірність виходу випадкової величини за

вказані межі нормативними документами не встановлено. Крім того, технічне обслуговування вагонів на сортировочних станціях виконують працівники вагонного господарства, при цьому нормування їх штату здійснюють виходячи з можливості обслуговування поступаючого числа вагонів впродовж доби безвідносно до часу обслуговування окремого поїзда.

У навчальній літературі [15] норму часу на технічне обслуговування вагонів вантажних поїздів по відправленню трактує як граничну, а середню тривалість операції визначають за формулою:

$$t_{\text{обр}} = (1 - \alpha) \frac{\tau_{\text{осм}} m}{k_{\text{гр}}} + \alpha \left(t_{\text{рем}} + \frac{\tau_{\text{осм}} m}{2k_{\text{гр}}} \right), \quad (1)$$

де α – частка складових, що потребують безотцепного ремонту вагонів; $\tau_{\text{осм}}$ – середня тривалість технічного огляду одного вагона; m – кількість вагонів в складі поїзда; $k_{\text{гр}}$ – кількість груп оглядачів вагонів в бригаді ПТО; $t_{\text{рем}}$ – середня тривалість безотцепного ремонту вагонів, що припадає на один склад.

У [15] як приклад наведено наступні значення параметрів виразу (1): $\alpha = 0,6$; $\tau = 0,96$ мин, $t_{\text{рем}} = 15$ мин. При цьому в нормативних документах, ні в навчальній літературі, ні в наукових працях не вказано порядок оцінки цих параметрів для конкретної станції.

У даному дослідженні розглянуто роботу сортировочних станцій Клепаров (Львівська залізниця) і Баладжары (Азербайджанська залізниця). Обробку поїздів по відправленню на обох станціях виконує одна бригада ПТО в складі однієї групи. Технологічні процеси роботи станцій Клепаров і Баладжары містять норми часу на технічне обслуговування поїздів по відправленню, які становлять відповідно 45 і 48 мин для складових поїздів з 57 вагонів.

Тривалість обслуговування складу поїзда бригадою, що складається з однієї групи, пропорційна кількості вагонів в ньому і може бути встановленою як:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$t_{\text{обр}} = t_{\text{нк}} + \tau m$$

где $t_{\text{нк}}$ – затраты времени на выполнение начальных и конечных операций;

τ – средняя продолжительность технического обслуживания одного вагона в поезде.

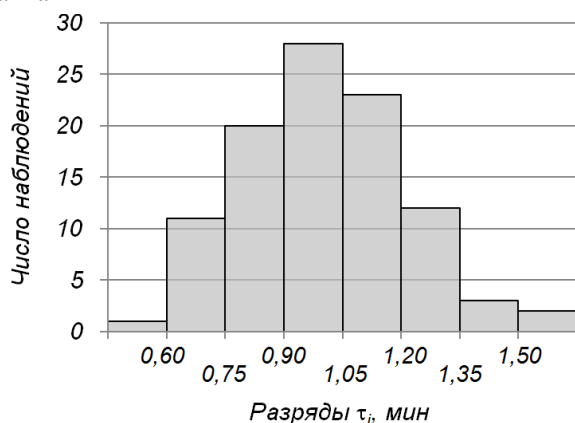
Примем, что затраты времени на выполнение начальных и конечных операций для разных поездов изменяются незначительно. В этих условиях продолжительность технического осмотра и ремонта, приходящиеся на один вагон i -го поезда, могут быть установлены как:

$$\tau_i = \frac{t_{\text{обр}} - t_{\text{нк}}}{m}.$$

В расчетах принято, что $t_{\text{нк}} = 1$ мин. В результате нормативная продолжительность технического обслуживания одного вагона для станции Клепаров составляет 0,77 мин, а для станции Баладжары 0,82 мин.

Для оценки продолжительности обслуживания вагонов по отправлению на основании журналов формы ВУ–14 получены выборки значений продолжительности обслуживания поездов и числа вагонов в них. Гистограмма случайной величины τ_i для станции Клепаров представлена на рис. 1, а, а для станции Баладжары – на рис. 1, б.

а – а



б – б

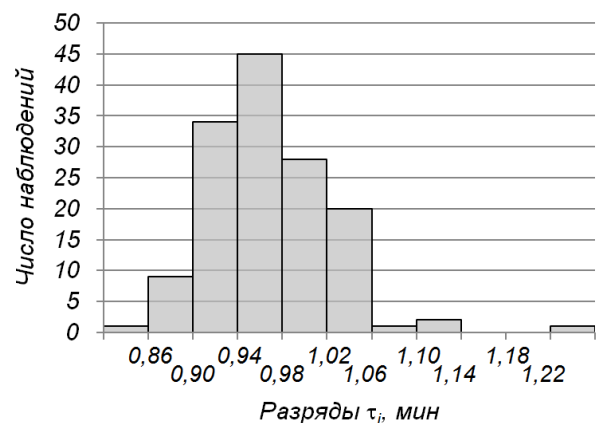


Рис. 1. Гистограммы распределения случайной величины:
а – станция Клепаров; б – станция Баладжары

Fig. 1. Distribution histograms of random variable:
а – Kleparov station; б – Baladzhar station.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В этой связи при нормировании продолжительности технологических операций на станциях обязательно нужно проводить их обследование с целью выявления характерных особенностей работы.

Сравнение реальных продолжительностей технического обслуживания вагонов по отравлению на обеих станциях с нормативными значениями показывает, что они не соответствуют друг другу. Так, на станции Клепаров нормативное время технического обслуживания вагонов было превышено в 83 % наблюдаемых случаев, а на станции Баладжары – в 100 %. Учитывая то, что обе станции устойчиво работают в течение длительных периодов, основной причиной несоответствия, по-видимому, являются нормы, установленные без учета местных условий работы станций и методов контроля их выполнения.

Классическая карта Шухарта – это график значений определенных характеристик подгрупп в зависимости от их номеров. Она имеет центральную линию (CL), соответствующую эталонному значению характеристики. При оценке того, находится ли процесс в статистически управляемом состоянии, эталонным обычно служит среднее арифметическое рассматриваемых данных μ . При управлении процессом в качестве эталона может быть установлено значение, которое задано в технических условиях, номинальное значение, основанное на предыдущей информации о процессе или намеченное целевое значение характеристики продукции или услуги. Карта Шухарта имеет две статистические определяемые контрольные границы относительно центральной линии, которые называют верхней (UCL) и нижней контрольной границей (LCL). Контрольные границы на карте Шухарта находятся на расстоянии 3σ от центральной линии, где σ – генеральное стандартное отклонение используемой статистики. Границы $\pm 3\sigma$ указывают, что около 99,7 % значений характеристики подгрупп попадут в эти пределы при условии, что процесс находится в статистически управляемом состоянии. Нахождение всех точек контрольной карты между контрольными границами UCL и LCL можно рассматривать как свидетельство нахождения процесса в статистически управля-

емом состоянии. При этом существует риск, равный 0,3 %, что нанесенная точка окажется вне контрольных границ, когда процесс стабилен. Для интерпретации хода технологических процессов и проверки наличия особых причин, воздействующих на него, область между контрольными границами UCL и LCL делят на шесть зон шириной σ , которые располагаются симметрично от центральной линии CL :

- зона А: от $\mu+2\sigma$ до $\mu+3\sigma$;
- зона В: от $\mu+\sigma$ до $\mu+2\sigma$;
- зона С: от μ до $\mu+\sigma$;
- зона С: от $\mu-\sigma$ до μ ;
- зона В: от $\mu-2\sigma$ до $\mu-\sigma$;
- зона А: от $\mu-3\sigma$ до $\mu-2\sigma$.

Указанные зоны позволяют установить признаки того, что процесс находится в статистически неуправляемом состоянии. Один из возможных наборов таких признаков приведен в работе [25], в соответствии с которой процесс находится в статистически неуправляемом состоянии, если на контрольной карте присутствуют следующие признаки:

- хотя бы одно из значений лежит за зоной А, т. е. выше контрольной границы UCL или ниже границы LCL (признак 1);
- 9 точек подряд лежат по одну сторону от центральной линии (признак 2);
- 6 возрастающих или 6 убывающих подряд точек (признак 3);
- 13 попеременно возрастающих и убывающих последовательных точек, напоминающих периодический процесс (признак 4);
- 9 последовательных точек, периодически находящихся выше и ниже центральной линии (признак 4а);
- 2 из 3 последовательных точек лежат в одной из зон А (признак 5);
- 4 из 5 последовательных точек лежат в зоне В или вне ее в зоне А по одну сторону от средней линии (признак 6);
- 13 последовательных точек в зоне С выше и ниже средней линии (признак 7);
- 5 последовательных точек по обеим сторонам средней линии и ни одной в зоне С (признак 8).

Технологические процессы работы железнодорожных станций имеют ряд характерных особенностей по сравнению с большинством

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

технологических процессов промышленности, для которых применяют методы статистического управления. Это связано с тем, что нормируемым параметром для станций является продолжительность технологических операций, а не геометрические размеры изделий. Так, минимальная продолжительность технического обслуживания вагонов ограничена скоростью прохода осмотровика вдоль состава, а доля вагонов с техническими неисправностями относительно невелика. В этой связи возможность ускорения продолжительности технического обслуживания вагонов отдельного поезда по сравнению со средним весьма ограничена. В то же время такие причины, как появление вагонов с техническими неисправностями, могут вызывать значительное увеличение продолжительности технологических процессов. Поэтому, как правило, для случайной величины продолжительности технологических процессов на железнодорожных станциях характерна асимметрия, и она не подвержена нормальному закону распределения. В этой связи порядок построения контрольных карт требует модификации.

Результаты

Учитывая, что контролируемой характеристикой технологических процессов железнодорожных станций является их продолжительность, которая измеряема, то для статистического управления ими могут быть использованы количественные контрольные карты индивидуальных значений.

В случае, если продолжительность технологического процесса X подчинена логарифмически – нормальному закону распределения, для определения контрольных границ можно использовать параметры случайной величины $Y = \ln(T)$, ее математическое ожидание μ и среднее квадратическое отклонение σ . Центральную линию контрольной карты проводят на уровне e^μ , контрольные границы – на уровнях $e^{\mu \pm 3\sigma}$ и границы зон – на уровнях $e^{\mu \pm 2\sigma}$ и $e^{\mu \pm \sigma}$. Для оценки параметров распределения величин

Y на начальном этапе внедрения методов статистического управления целесообразно использовать информацию о предыдущем протекании технологического процесса.

На основании обработки результатов наблюдений определено положение контрольных границ для станций Клепаров и Баладжары. При определении параметров распределения для станции Клепаров из выборки исключены значения меньше 0,5 мин на вагон. Это связано с тем, что среди наблюдаемых значений не было ни одного, которое попадает в интервал 0,5–0,6 мин на вагон. На станции Баладжары не было наблюдений проведения технического обслуживания с такой скоростью.

Для станции Баладжары из выборки исключено значение средней продолжительности осмотра вагонов в поезде, равное 1,26, которое классифицировано как нетипичное из-за превышения верхней контрольной границы.

Полученные контрольные карты для станций Клепаров и Баладжары представлены соответственно на рис. 2, а и б.

В обоих случаях технологический процесс может быть охарактеризован как статистически неуправляемый, что характерно для случаев, когда контрольные карты строят впервые. Анализ контрольной карты для станции Клепаров показывает, что имеют место случай выхода среднего времени осмотра вагона в поезде за пределы нижней контрольной границы (признак 1). Кроме того, имеет место случай шести возрастающих подряд точек (признак 3). Анализ контрольной карты для станции Баладжары показывает, что имеет место случай выхода среднего времени осмотра вагона в поезде за пределы верхней контрольной границы (признак 1).

В дальнейшем при разработке контрольных карт для контроля и управления технологическими процессами железнодорожных станций можно устанавливать прогрессивные нормы на основании статистического анализа результатов работы разных смен либо разных станций с подобной технологией.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

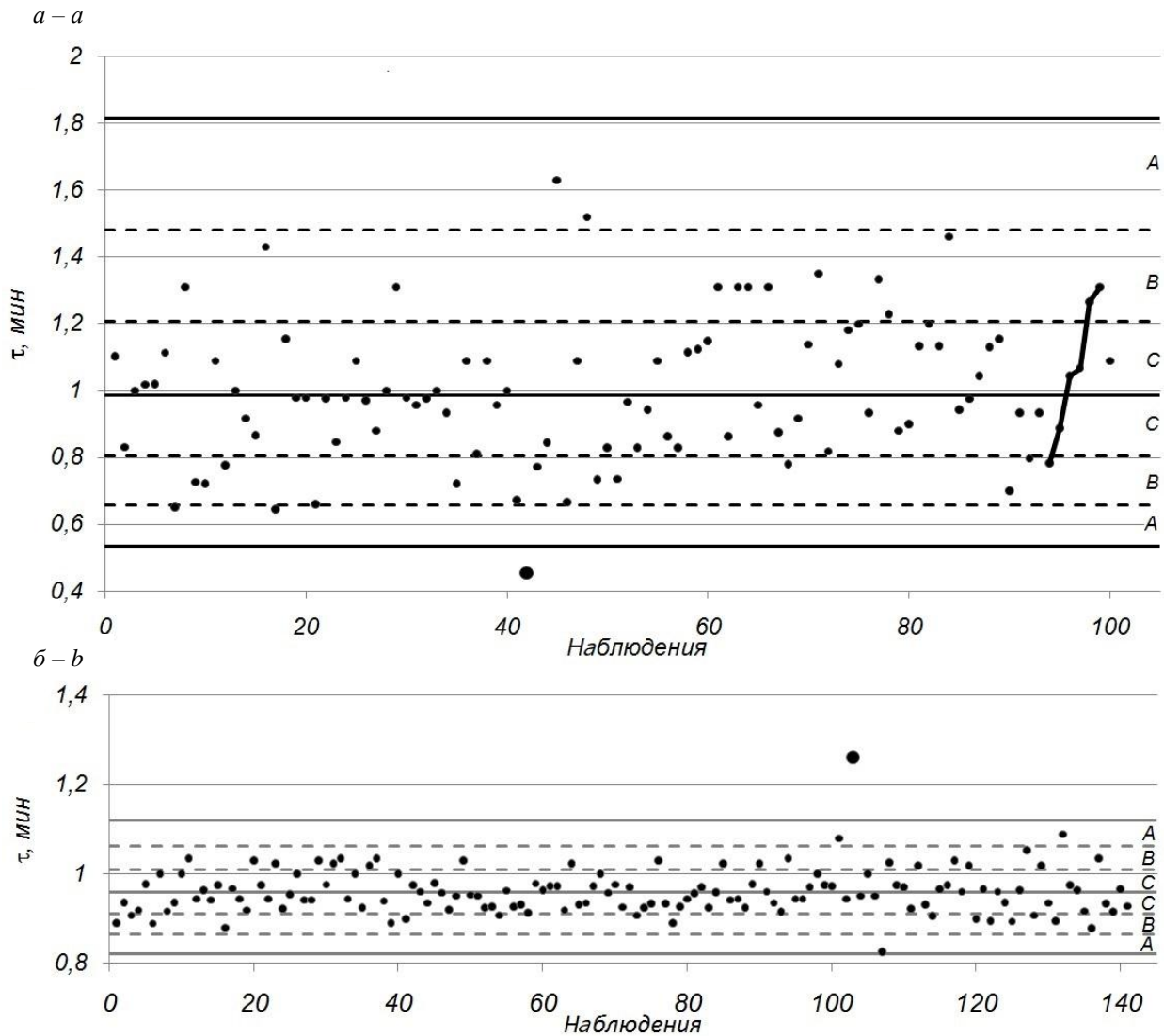


Рис. 2. Контрольная карта для статистического управления технологическим процессом технического обслуживания поездов по отправлению:
a – станция Клепаров; *b* – станция Баладжары

Fig. 2. Control chart for statistical management of the technological process of technical maintenance of trains by departure:
a – Kleparov station; *b* – Baladzhar station

Научная новизна и практическая значимость

В данной работе впервые предложен метод управления технологическими процессами железнодорожных станций, основанный на использовании контрольных карт Шухарта. Применение предложенного метода позволяет, с одной стороны, адекватно выполнять кон-

троль продолжительности технологических операций, представляющих собой, как правило, случайные величины, а с другой – оценивать возможность реализации установленных технологическими процессами норм. На железнодорожном транспорте налажен систематический сбор информации о ходе технологических процессов, который в значительном числе случаев либо уже автоматизирован, либо подлежит ав-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

томатизації. Поєтому введення нових статистических методів контролю технологіеских процесів в основному буде зв'язано з розробкою нормативних документів, совершенствованием програмного забезпечення інформаційних систем, обученням персоналу, що не передполагає значительних економіеских витрат. Організація накоплення статистическої інформації о ході виконання технологіеских процесів також дозволить суттєво упростити побудову адекватних імітаційних моделей, учитываючих стохастичний характер функціонування залізничних станцій.

Выводи

Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Сущескуючі методи контролю і управління технологіескими процесами залізничних станцій орієнтовані на виконання планових кільесвенних показателів і не дозволяють оцінювати ефективність роботи станції по відношенню до окремої перевезки. Крім того, для такого підходу характерен значительний рівень суб'єктивізму як при установленні планових показателів, так і при оцінці результатів роботи залізничних станцій. В цій зв'язі застосовувані методи контролю і управління технологіескими процесами залізничних станцій потребують совершенствования.

2. Основним критерієм для оцінки якості виконання технологіеских процесів, зв'язаних з обробкою поїздів, вагонів, локомотивів, контейнерів, вантажів, документів і інформації на залізничних станціях являється їх тривалість. Учитываючи те, що витрати часу на обробку вказаних об'єктів являються випадковими величинами, для контролю і управління технологіескими процесами станцій доцільно використовувати статистическі методи, в частности карти Шухарта.

3. На основі аналізу інформації о передьдущем протеканні технологіеского процесу обслуговування вантажних поїздів по відправленню на станціях Клепарів і Баладжари побудовані контрольні карти Шухарта для їх статистического контролю. Установлено, що, во-перших, в обох випадках технологіескі процеси являються статистически неуправляемыми, а во-вторых, існують суттєві відмінності між заданими в технологіескі процеси роботи станції нормами і реальною тривалістю обслуговування поїздів по відправленню.

4. Внедрення статистических методів управління технологіескими процесами залізничних станцій може бути реалізовано на основі існуючих автоматизованих систем управління, що не зв'язано з значительними капітальними витратами, а також збільшенням навантаження на персонал станцій.

СПИСОК ІСПОЛЬЗОВАНИХ ІСТОЧНИКОВ

1. Агаміров, Л. В. Методи статистического аналізу механіеских випробувань / Л. В. Агаміров. – Москва : Інтернет Інжинірінг, 2004. – 128 с.
2. Адлер, Ю. П. Контрольні карти Шухарта в Росії і за рубежом: короткий огляд сучасного стання (статистическі аспекти) [Електронний ресурс] / Ю. П. Адлер, О. В. Максимова, В. Л. Шпер // Стандарти і якість. – 2011. – № 8. – Режим доступу: <http://ria-stk.ru/upload/image/stq/2011/N8/082011-1.pdf> – Загл. с екрана. – Проверено : 05.09.2019.
3. Березовий, М. І. Оцінка пропускнуої спроможності промислової сортувальної станції з використанням її ергатичної моделі / М. І. Березовий, В. В. Малашкін, Р. Г. Коробйова // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 4. – С. 9–12. doi: <https://doi.org/10.15802/tstt2012/17119>
4. Бутько, Т. В. Інтелектуальне управління сортувальними станціями при перевезеннях небезпечних вантажів на основі багатозалежної оптимізації / Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 5 (77). – С. 41–52. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018>
5. Верлан, А. І. Графоаналітеская модель функціонування залізничних станцій / А. І. Верлан // Восточно-Европейский журнал передових технологій. – 2014. – Т. 6, № 3(72). – С. 21–26.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

6. Власов, В. А. Моделирование технологических процессов изготовления промышленной продукции / В. А. Власов, И. А. Тихомиров, И. И. Локтев. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2006. – 300 с.
7. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации (ЕСТД). Термины и определения основных понятий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200012103> – Загл. с экрана. – Проверено : 04.09.2019.
8. Зайцев, Г. Н. Управление качеством. Технологические методы управления качеством изделий / Г. Н. Зайцев. – Санкт-Петербург : Питер, 2014. – 271 с.
9. Козаченко, Д. М. Організація передпроектного обстеження залізничних станцій та вузлів / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, О. В. Горбова // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 7. – С. 27–32. doi: <https://doi.org/10.15802/tstt2014/35985>
10. Коробйова, Р. Г. Адекватність математичних моделей для визначення техніко-експлуатаційних показників роботи станцій / Р. Г. Коробйова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 28. – С. 29–33.
11. Лаврухин, А. В. Формирование интеллектуальной модели функционирования железнодорожной станции при выполнении поездной работы / А. В. Лаврухин // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 43–53. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2015/38239>
12. Об утверждении Типового технологического процесса работы сортировочной станции ОАО «РЖД» (Вместе с Типовым технологическим процессом) [Электронный ресурс] : утв. распоряж. ОАО «РЖД» от 11.12.2014 N 2927р. – Режим доступа: http://tender.rzd.ru/dbmm/download?vp=53&load=y&col_id=595&id=416383 – Загл. с экрана. – Проверено : 04.09.2019.
13. Практичні рекомендації щодо складання технологічного процесу роботи сортувальної станції : ЦД-0081 : затв. наказом Укрзалізниці від 22.12.2009 р. № 715-Ц. – Київ : Поліграфсервіс, 2010. – 230 с.
14. Рахматуллин, А. И. Математические модели и методы оптимизации нестационарных систем обслуживания / А. И. Рахматуллин, В. С. Моисеев. – Казань : Школа, 2006. – 212 с.
15. Сотников, И. Б. Эксплуатация железных дорог. В примерах и задачах / И. Б. Сотников. – Москва : Транспорт, 1990. – 232 с.
16. Филонов, И. П. Вероятностно-статистические методы оценки качества в машиностроении / И. П. Филонов, А. И. Медведев. – Минск : Тесей, 2000. – 127 с.
17. Хамидуллина, Е. А. Управление рисками производственного травматизма на железнодорожном транспорте на основе статистического анализа / Е. А. Хамидуллина, М. Н. Тарасова // XXI век. Техносферная безопасность. – 2016. – № 1 (1). – С. 88–95.
18. Bobrovskiy, V. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automate / V. Bobrovskiy, D. Kozachenko, R. Vernigora // Transport Problems. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 57–65.
19. Feld, M. Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn / M. Feld. – Warsaw : Wydawnictwa naukowo-techniczne, 2003. – 708 s.
20. ISO 7870-2:2013. Control Charts. Part 2: Shewhart Control Charts [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/40174.html> – Загл. с экрана. – Проверено : 09.09.2019.
21. Lecic, D. Models and standards for production systems integration: Technological process and documents / D. Lecic // Yugoslav Journal of Operations Research. – 2016. – Vol. 15. – Iss. 2. – P. 221–241. doi: <https://doi.org/10.2298/yjor05022211>
22. Mahmudova, S. Methods of Organizing the Technological Process of Software Development / S. Mahmudova // Review of Information Engineering and Applications. – 2018. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 1–11. doi: <https://doi.org/10.18488/journal.79.2018.51.1.11>
23. Samsonkin, V. Development of the method of efficient monitoring of the main activity of a train driver / V. Samsonkin, Y. Petinov // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 3/3 (81). – С. 52–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71703>
24. Shewhart, W. A. Economic Control of Quality of Manufactured Product / W. A. Shewhart. – New York : D. Van Nostrand Company, 1931. – 467 p.
25. Trietsch, D. Statistical Quality Control: A Loss Minimization Approach [Электронный ресурс] / D. Trietsch. – 1999. – 404 p. – Режим доступа: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/3378> – Загл. с экрана. – Проверено : 05.09.2019. doi: <https://doi.org/10.1142/337810.1142/3378>
26. UNIT 1. The Technological Process [Электронный ресурс] // IES Villablanca. – Режим доступа: <https://u.to/dNk-Fg> – Загл. с экрана. – Проверено : 05.09.2019.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Д. М. КОЗАЧЕНКО^{1*}, Ю. М. ГЕРМАНЮК^{2*}, Е. К. МАНАФОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта kozachenko@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}Каф. «Транспортні технології», Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, тел. +30 (032) 267 99 74, ел. пошта yuhermanyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

^{3*}Каф. «Експлуатація залізничного транспорту», Азербайджанський технічний університет, пр. Г. Джавида, 25, Баку, Азербайджан, AZ 1073, тел. +994 (55) 741 79 39, ел. пошта elshan_manafov@mail.ru, ORCID 0000-0001-5697-577X

ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ

Мета. У цій статті автори передбачають розробити статистичні методи контролю технологічних процесів роботи залізничних станцій на основі контрольних карт Шухарта. **Методика.** Дослідження в статті виконано на основі методів статистичного контролю якості й теорії експлуатації залізниць. **Результати.** Наявні методи контролю виконання технологічних процесів залізничних станцій орієнтовані на досягнення кількісних показників їх роботи за безумовного виконання необхідного переліку технологічних операцій і дотримання вимог безпеки руху поїздів. У той же час проблема контролю дотримання якісних показників роботи станцій вимагає додаткових досліджень. Основним критерієм для оцінки якості виконання технологічних процесів, пов'язаних з обробкою поїздів, локомотивів, вагонів, контейнерів, вантажів, документів та інформації на залізничних станціях є їх тривалість. З огляду на те, що витрати часу на обробку зазначених об'єктів є випадковими величинами, для контролю й управління технологічними процесами станцій у статті запропоновано використовувати статистичні методи, зокрема карти Шухарта. Як приклад розглянуто процеси технічного обслуговування вагонів вантажних поїздів по відправленню і побудовано карти Шухарта для станцій Клепарів і Баладжари. Аналіз роботи обох станцій показав наявність істотного впливу місцевих умов на тривалість технічного обслуговування составів поїздів по відправленню, а також значні відхилення між його нормативною та фактичною тривалістю. **Наукова новизна.** У цій роботі вперше запропоновано метод управління технологічними процесами залізничних станцій, заснований на використанні контрольних карт Шухарта. **Практична значимість.** Застосування запропонованого методу дозволяє, з одного боку, адекватно здійснювати контроль тривалості технологічних процесів та окремих технологічних операцій, що, як правило, є випадковими величинами, а з іншого – оцінювати можливість реалізації встановлених технологічними процесами норм. Окрім того, організація накопичення статистичної інформації про хід виконання технологічних процесів також дозволить істотно спростити побудову адекватних імітаційних моделей, що враховують стохастичний характер функціонування залізничних станцій.

Ключові слова: залізничний транспорт; залізнична станція; технологічний процес; статистичний контроль якості; карти Шухарта

D. M. KOZACHENKO^{1*}, Y. N. HERMANIUK^{2*}, E. K. MANAFOV^{3*}

^{1*}Dep. «Operational Management», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail kozachenko@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}Dep. «Transport Systems», Lviv Branch of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan I. Blazhkevych St., 12 a, Lviv, Ukraine, tel. +30 (032) 267 99 74, e-mail yuhermanyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

^{3*}Dep. «Railway Transport Operation», Azerbaijan Technical University, G. Javid Av., 25, Baku, Azerbaijan, AZ 1073, tel. +994 (12) 741 79 39, e-mail elshan_manafov@mail.ru, ORCID 0000-0001-5697-577X

CONTROL ORGANIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF RAILWAY STATIONS ON THE BASIS OF STATISTICAL METHODS

Purpose. The article is aimed to develop statistical methods for monitoring the technological processes of railway stations` operation based on Stewhart charts. **Methodology.** The research is based on the methods of statistical quality control and the theory of railways operation. **Findings.** Existing methods for monitoring the implementation of technological processes of railway stations are focused on achieving quantitative indicators of their work while unconditionally fulfilling the necessary list of technological operations and observing train movement safety requirements. At the same time, the problem of monitoring compliance with quality indicators of railway stations` operation requires additional research. The main criterion for evaluating the quality of technological processes associated with the processing of trains, locomotives, cars, containers, cargoes, documents and information at railway stations is their duration. Considering that the time spent on processing these objects is random, it is proposed to use statistical methods, in particular, Stewhart charts, for monitoring and controlling the technological processes of the stations` operation. As an example, we discussed the processes of maintenance of freight train cars after departure and constructed Stewhart charts for Kleparov and Baladzhar'y stations. Operation analysis of both stations showed a significant influence of local conditions on the duration of train maintenance by departure, as well as significant deviations between its standard and actual duration. **Originality.** For the first time this paper proposed a method for controlling technological processes of railway stations based on the use of Stewhart control charts. **Practical value.** Application of the proposed method makes it possible, on the one hand, to adequately control the duration of technological processes and individual technological operations, which are usually random variables, and on the other hand, to evaluate the feasibility of implementing the norms established by technological processes. In addition, the organization at the stations of accumulating statistical information on the progress of technological processes will also significantly simplify the construction of adequate simulation models that take into account the stochastic nature of railway stations` functioning.

Keywords: railway transport; railway station; technological process; statistical quality control; Stewhart charts

REFERENCES

1. Agamirov, L. V. (2004). *Metody statisticheskogo analiza mekhanicheskikh ispytaniy*. Moscow: Internet Inzhiniring. (in Russian)
2. Adler, Y. P., Maksimova, O. V., & Shper, V. L. (2011). Kontrolnye karty Shukharta v Rossii i za rubezhom: kratkiy obzor sovremennogo sostoyaniya (statisticheskie aspekty). *Standarty i kachestvo*, 8. Retrieved from <http://ria-stk.ru/upload/image/stq/2011/N8/082011-1.pdf> (in Russian)
3. Berezovyi, M. I., Malashkin, V. V., & Korobiova, R. H. (2012). Evaluation Capacity Industrial Yard with Her Ergatic Model. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezen*, 4, 9-12. doi: <https://doi.org/10.15802/tstt2012/17119> (in Ukrainian)
4. Butko, T. V., Prokhorov, V. M., & Chekhunov, D. M. (2018). Intelligent control of marshalling yards at transportation of dangerous goods based on multiobjective optimization. *Science and Transport Progress*, 5(77), 41-52. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018> (in Ukrainian)
5. Verlan, A. I. (2014). Grafoanaliticheskaya model funktsionirovaniya zheleznodorozhnykh stantsiy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/3(72), 21-26. (in Russian)
6. Vlasov, V. A., Tikhomirov, I. A., & Loktev, I. I. (2006). *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya promyshlennoy produktsii*. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo uni-versiteta. (in Russian)
7. Unified system for technological documentation. Terms and definitions of main concepts. GOST 3.1109-82. Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200012103> (in Russian)
8. Zaytsev, G. N. (2014). *Upravlenie kachestvom. Tekhnologicheskie metody upravleniya kachestvom izdeliy*. St. Petersburg: Piter. (in Russian)
9. Kozachenko, D. M., Vernyhora, R. V., & Horbova, O. V. (2014). Organization of the pre-survey train stations and nodes. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 0(7), 27-32. doi: <https://doi.org/1010.15802/tstt2014/35985> (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

10. Korobyova, R. H. (2009). The Adequacy of Mathematical Models for Determination of the Performance of the work Station. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 28, 29-33. (in Ukrainian)
11. Lavrukhin, O. V. (2015). Intellectual model formation of railway station work during the train operation execution. *Science and Transport Progress*, 1(55), 43-53. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2015/38239> (in Russian)
12. Ob utverzhdenii Tipovogo tekhnologicheskogo protsessa raboty sortirovochnoy stantsii OAO «RZhD» (Vmeste s Tipovym tekhnologicheskim protsessom), N 2927p. (2014). Retrieved from http://tender.rzd.ru/dbmm/download?vp=53&load=y&col_id=595&id=416383 (in Russian)
13. Praktychni rekomendatsii shchodo skladannia tekhnolohichnoho protsesu roboty sortivalnoi stantsii. (2010). TsD-0081: nakaz Ukrzaliznytsi No. 715-TS. Kyiv: Polihrafservis. (in Ukrainian)
14. Rakhmatullin, A. I., & Moiseev, V. S. (2006). *Matematicheskie modeli i metody optimizatsii nestatsionarnykh sistem obsluzhivaniya*. Kazan: Shkola. (in Russian)
15. Sotnikov, I. B. (1990). *Ekspluatatsiya zheleznykh dorog. V primerakh i zadachakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
16. Filonov, I. P., & Medvedev, A. I. (2000). *Veroyatnostno-statisticheskie metody otsenki kachestva v mashinostroenii*. Minsk: Tesey. (in Russian)
17. Khamidullina, E. A., & Tarasova, M. N. (2016). Statistics-based occupational traumatism risk management in railway industry. *Technosphere Safety. XXI Century*, 1(1), 88-95. (in Russian)
18. Bobrovskiy, V., Kozachenko, D., & Vernigora, R. (2014). Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automate. *Transport Problems*, 9(3), 57-65. (in English)
19. Feld, M. (2003). *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*. Warsaw: Wydawnictwa naukowo-techniczne. (in Polish)
20. ISO 7870-2:2013. Control Charts. Part 2: Shewhart Control Charts. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/40174.html> (in English)
21. Lecic, D. (2005). Models and standards for production systems integration: Technological process and documents. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 15(2), 221-241. doi: <https://doi.org/10.2298/yjor05022211> (in English)
22. Mahmudova, S. (2018). Methods of Organizing the Technological Process of Software Development. *Review of Information Engineering and Applications*, 5(1), 1-11. doi: <https://doi.org/10.18488/journal.79.2018.51.1.11> (in English)
23. Samsonkin, V., & Petinov, Y. (2016). Development of the method of efficient monitoring of the main activity of a train driver. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/3(81), 52-58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71703> (in English)
24. Shewhart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. New York: D. Van Nostrand Company. (in English)
25. Trietsch, D. (1999). *Statistical Quality Control: A Loss Minimization Approach*. doi: <https://doi.org/10.1142/337810.1142/3378> (in English)
26. UNIT 1. The Technological Process. *IES Villablanca*. Retrieved from <https://u.to/dNk-Fg> (in English)

Поступила в редколлегию: 06.03.2019

Принята к печати: 01.07.2019

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

UDC 629.4.015:625.1.032

I. O. BONDARENKO^{1*}, L. O. NEDUZHA^{2*}

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 802 21 80, e-mail irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{2*}Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 810 51 65, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE ROLLING STOCK DYNAMICS ON THE INTENSITY OF USING THE RAILWAY TRACK ELEMENTS

Purpose. The main purpose of this work is to research deformability parameters of the railway track under various operating conditions as the initial data for the formation of forced oscillations of rolling stock and the trackform use intensity. **Methodology.** For the research, an original model of the trackform, described with using the basic concepts of the theory of elasticity and the propagation of elastic waves was developed. **Findings.** It has been established that the ratio between the intensity of work of elements and the trackform, as criteria for deformability, can be used as the estimated parameters of the functionally safe operation of the track. It can be the basis for the classification of critical track states under which it had to perform work to restore its working capacity in order to ensure the required level of efficiency of use construction during the service life. **Originality.** Trackform and parameters of the elements of the track superstructure and substructure can be described using the railway tracks deformability behaviour. In the future this conclusion will help to increase the efficiency of the dynamic properties of rolling stock when designing and maintain in readiness the infrastructure while in operation. **Practical value.** Changes in the regulatory framework of rail transport in recent years provide for the observance of its functional safety, therefore, the question of the need to assess the impact of rolling stock on the way to be regarded as a dynamic process with consideration to the deformability resistance track. This research provides a basis for record of the stiffness of deformation that allows creating the regulatory framework for the functional safety of the railway track in Ukraine.

Keywords: trackform; deformability parameters; oscillation; deformability of the railway track

Introduction

The issue of providing the reliable and safe operation of the railway track and rolling stock during their interaction has existed since the introduction of railway transport. The requirements for the said objects of interaction were forming gradually and depended on the level of knowledge and technologies. Thus, before introduction of rails of P50, UIC60, P65 types and reinforced concrete sleepers in the trackform, the main requirements were the provision of railway track element strength and the track panel stability under the influence of increasing loads and speeds of the

rolling stock. The use of the aforesaid track structure components completely provided the superstructure strength under the weight of a rolling stock. From 70s of the last century, the new requirements were forming, and it has resulted in approving the international standards such as IEC 62278:2002, EN 50126-1-2017, EN 50126-2-2017 and IEC 60300-3-3:2017.

The modern requirements for transport system maintenance strategy are directed for minimizing the lifecycle cost, and for maximizing the reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) of the transport systems. All the issues related to defining the functionally safe operation

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

of transport systems imply the study and evaluation of dynamic processes resulting from the interaction in time between the railway track and rolling stock. The influence of dynamic processes in time becomes decisive while assessing the functionally safe operation of modern speed projects such as «Aero Train» (Yasuaki Kohama), «Hyperloop» (Elon Musk). In order to ensure the functionally safe operation of any transport system, it is required to know which changes occur in its elements in time and how the functionally safe status of each element as well as their aggregate affect the system's operation. Indeed, in order to predict the operation of subgrade under actual climate and service conditions, it is required to consider in time the process of permanent deformation accumulation in it. In other words, it is required to figure out the following issues: a) which changes occur in the subgrade as a result of multiple force impact by a rolling stock with respect to the change in temperature and soil moisture; b) how the process of change in temperature and moisture in the subgrade occurs under the influence of force, electromagnetic and gravitational fields.

The influence of force fields in the hard texture elements is researched insufficiently. The study of stress-strain state of the railway track elements results in identifying the peak stresses and deformations while using the full force value. The deformability of the railway trackform as the aggregate of deformations and shifts is presented as an influence line (field, when the finite element method is used). It is considered that the influence line shifts together with the force motion. In all the mathematical models of railway track calculation, it is taken that the influence of force field spreads evenly in all directions, i.e. the principle of force field transfer is used due to longitudinal waves how it occurs in liquid and gaseous media. The influence of longitudinal waves is not taken into account in the models. It may cause the error during calculation because it does not allow reflecting the physical process of transferring the force fields in the solid bodies and between them.

While running the test on the rolling stock's influence on the railway track, a huge number of statistical data on strain-stress state of the track have been obtained. They describe different deformability of the same length of the track under

the influence of the same rolling stock. The different statistical data are conditioned by the process of mutual influence of the rolling stock and the railway track. We consider next the issue of analyzing the parameters of railway track deformability under various operating conditions as the initial data for forming the forced oscillations of the railway rolling stock and the intensity of using the trackform elements.

Purpose

The main purpose of this work is to study deformability parameters of the railway track under various operating conditions as the initial data for the formation of forced oscillations of rolling stock and the intensity in the use of elements of the trackform. The object of the study is the process of mutual influence of the railway rolling stock and the track. The subject of the study is the deformability of the railway track under various operating conditions as a factor in the formation of dynamic irregularities.

Methodology of investigation

The main macro indicators of the operation of the railway transport infrastructure are the availability and economic efficiency coefficients. Currently, many studies have been devoted to the problems of studying the mathematical description of perturbations acting on the track and the crew during their interaction [2-3, 5-23]. Each article adds an important part of the overall process of the track and rolling stock interaction. Articles [2, 5-6, 10, 12, 13, 15-17, 20, 21-23] focus on analysing the simulation results delivered with implementation of the mathematical models of the rolling stock: for transport carriages [2, 5, 22], for real locomotives [6, 13, 16, 20, 21], for locomotive-roller rig coupled system [9], for general rail vehicle [10, 12, 15, 17, 23]. Paper [3] describes the mechanism of transferring force from the rolling stock to the trackform. The simplified method to determine a vertical impact force of the wheel with flat and rail interaction is presented in this article. This article demonstrates the influence of the wheel with flat geometrical parameters, speed of a vehicle to maximum contact force and its distribution in the contact zone. Articles [7, 11,

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

14, 16, 18, and 19] are dedicated to studying the track and the rolling stock interaction.

The numerical model [7] is subsequently used to determine the track vertical and lateral stiffness. The work [11] proposes a computational methodology to study how the varying vehicle component characteristics, on normal and degraded conditions, impact on the vehicle/track interaction loads and on the track damage. The paper [14] proposes an approach for the validation of railway vehicle models based on on-track measurements. The tasks that are addressed in the research [18]: to perform tests at track irregularities of symmetrical sinusoidal shape running both along straight and curved tracks, as well as driving over the junctions along the straight and curved tracks, and compare the results. A novel wheel–rail contact model [19] is proposed to be implemented for multi-body dynamics simulation, in order to facilitate accurate online calculation of damage phenomena such as wear and rolling contact fatigue.

The above articles studies are very important issues, but they apply some of the approaches that restrict their research. Modern theoretical models, which study the track and rolling stock interaction, means and methods of recording oscillations used in experiments, while studying the track and rolling stock interaction, or assessing geometrical track states, have no mechanism for determining the source of vibration and the nature of the process of transferring these vibrations to the «rolling stock-track system». Consequently, the oscillograms of the railway track contain the superposition of both the impact of the rolling stock on the track and the response of the track, taking into account its deformability. The oscillograms on the rolling stock contain a superposition of both the impact of the rolling stock on the track and the other way round. These perturbations are not classified according to physic-mechanical and geometric characteristics of railway track construction elements that determine its deformability. Thus, changes in the conditions of rails and wheels contact with their tortuous motion remain unconsidered. Therefore, firstly, it has become necessary to study the mechanism of transferring force from the rolling stock to the trackform and vice versa in time. Secondly, there was a need to study the physics of the oscillation process and to differentiate the vibrations from the

physical-mechanical and geometric characteristics of the elements of the construction of the railway track, which determine its deformability.

Based on the experience gained, a model was developed for determining the processes of deformative operation of the railroad track [1, 4, 8].

The original model was created for investigating the dynamic problem of railway track deformability under the influence of the rolling stock. It applies the basic provisions of the theories of elasticity and propagation of elastic waves.

In the model, it is taken that the track and rolling stock interaction occurs by means of impulses. The impulses are transmitted via bond pads conditioned by the position of a wheel set along the track. The impulse duration is characterized by the time of transferring the load from the rolling stock to the rail and depends on the rolling stock speed. Any dynamic force is characterized by the impulse transmission frequency on a particular bond pad and by the impulse repetition frequency in particular section [1, 4, 8]. The impulses are characterized by the law of force change and the law of force intensity change in a contact time. A local system of force coordinates for each propagation of oscillations is always positioned in such a way so that the x axis coincides with the direction of force motion and the z axis – direction of force action. An explanation to the directions and angles is given in Fig. 1.

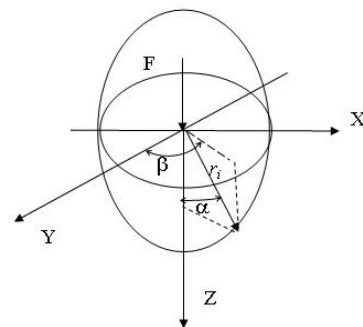


Fig. 1. Determining the directions and angles of oscillations propagation

Components of the wave vector along the axes of coordinates that define the plane of equal phases and amplitudes of oscillatory motion depend on the position of a local coordinate system of the force relative to the basic coordinate system of the structure. Thus, the position of a local coordinate system of the force relative to the basic coordinate

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

system of the structure defines both the directions of propagation of longitudinal and transverse waves and polarization of these waves.

The impulses are transmitted by the force waves. The process of force wave propagation is described by using the propagation properties of transverse and longitudinal waves. All oscillations generated by the contacting surfaces, which, up to the given point, have not touched or have renewed their contact after a break, propagate by spherical waves. They characterize the main direction of propagation of the wave process from a new or renewed contact between surfaces and account for the contact and local concentrations of stresses and deformations.

All oscillations generated by the contacting surfaces, which, up to the given point, have touched and established contacts, propagate by quasi spherical waves. They characterize the basic direction of propagation of the wave process from the contact point of the surfaces and account for the non-uniformity of oscillating. But one spherical wave of incidence that carries the longitudinal and transverse mode causes four quasi spherical refracted waves: two longitudinal and two transverse ones. Each of them is heterogeneous, as it has vivid dependence of the change in characteristics on its direction and carries the consequences from the neighboring refracted waves in other directions.

Since in the process of propagation there is the superposition of waves, it characterizes the non-uniformity of the whole process of oscillating. Thus, in every point of the structure in a certain period of action, one will observe either homogeneous spherical or non-uniform quasi spherical waves. Their availability and velocity of propagation are conditioned by stress-strain properties of element materials. Each wave affects the particle in different directions with respect to the direction of wave propagation. Each wave, while transiting from one element to the other, changes its properties. So, the calculation in the model is done with respect to the directions of force wave front propagation (r_i). The main dependences of motion-direction are shown in [1, 4]. As a result, the shift of structural particles in time has been obtained (s_i) (see Fig. 2-5).

We compared the values of the stresses at the rail base edge and head and the rail deflections

caused by running of ChS8 locomotive at a speed of 155 km/h . The experiment was carried out on a single-track section. The trackform elements: UIC60 rail track, reinforced concrete sleepers with KPP-5 type fastening, 40 cm ballast depth, the roadbed is a sandy loam subgrade. The modulus of the track elasticity in the vertical plane for calculation by the existing method was taken from the experimental data and made $U = 69.2 \text{ MPa}$. Table 1 shows the data calculated by the existing method «Track strength calculation», the proposed method and the experiment obtained ones.

Table 1

Data of the track stress-strain state obtained using various methods and experimentally

Method	Stresses (MPa) in rail		Rail deflection, mm
	Base edge	Head	
The existing method	115.7	120.69	1.56
The proposed method	159.5	145.9	2.81
Experiment	163.3	146.1	2.5

Based on the strain-stress properties and geometrical characteristics of the elements, the use of wave properties allows establishing: a) the reaction of elements to the force impact with respect to the time of its propagation; b) time ratio of impulse impact and its propagation along the length and depth of the trackform; c) change in amount of energy in any point of the structure in time. The aforementioned parameters allow changing the deformation processes by altering the element geometry and material properties.

Based on the described mathematical model, it is proposed to take as a composite index the deformable work of trackform elements (A_i):

$$A_i = \int_{t_1}^{t_2} P \cdot y dt, \quad (1)$$

where P – force that affects the element; y – shift caused by the force during the action [t_1 , t_2].

The amounts of shift have three-dimensional nature even for one section of the trackform. So, it

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

was proposed to define the deformable work of trackform (A) as the sum of works performed by all the track elements in one section under the influence of the rolling stock with respect to the time of perception and reaction of the elements:

$$A = \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} A_i dt, \quad (2)$$

n – a number of elements getting a force impact.

For evaluating and comparing the use of

trackform and elements under different operating conditions, it was proposed to use I – the intensity of deformable work of the elements or the structure (deformable work in the unit of time).

The investigation is carried out for the trackform model consisting of the following elements such as rails of R65 type, concrete sleepers of SB3 type, fastenings of KPP-5-K, ballast stone of 40 cm thick, subgrade. They are given in Table 2.

Table 2

The properties of trackform elements

Element	Density, kg/m ³		Poisson's coefficient		Young's module E, MPa		Cl, m/s ¹		Ct, m/s ²	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
rail	7 830	7 830	0.24	0.3	2.1x10 ⁵	2.1x10 ⁵	5 622	6 008	3 288	3 211
pad	918	935	0.3	0.485	100	200	382	1 572	204	268
sleeper	2 200	2 500	0.1	0.15	36 000	40 000	4 090	4 110	2 727	2 637
ballast	1 900	2 200	0.2	0.2	100	400	241	449	148	275
ground base	170	175	0.3	0.35	30	40	487	605	260	290

1 – the speed of longitudinal; 2 – the speed of transverse waves in the material

The rolling stock influence on the track was considered with respect to the central position of the wheel set. As a result of investigation, the following dependences were obtained, which are shown in Fig. 2-3.

The upper part of the diagram demonstrates the dependence of forces having an impact on the track with respect to the time at various motion speeds. The values of forces are given against the force value at the speed of 10 km/h. The lower part of the diagram demonstrates the dependence of oscillation amplitudes of the trackform section in time with respect to different motion speeds under the single force impact on the section.

In the existing models, it is assumed that the trackform deformability as a result of the rolling

stock influence occurs instantly. Figures 2 and 3 clearly demonstrate the falsehood of such assumption, depending on the time of impulse impact conditioned by the motion speed of the rolling stock.

The time of occurrence of the deformability process in the railway trackform due to the rolling stock impact depends on two constituents. The first constituent is the time of impulse impact that depends on the motion speed. Its value decreases together with the increase in motion speed. The second constituent is the time of propagation of force impact in the trackform elements. It depends on stress-strain and geometrical characteristics of trackform elements. For the same trackform, in case of the same-type force impact (the equal

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

direction of force and place of its application), this value is constant. Therefore, in case of increase in motion speed, the time of deformability process running in the trackform approaches the value of

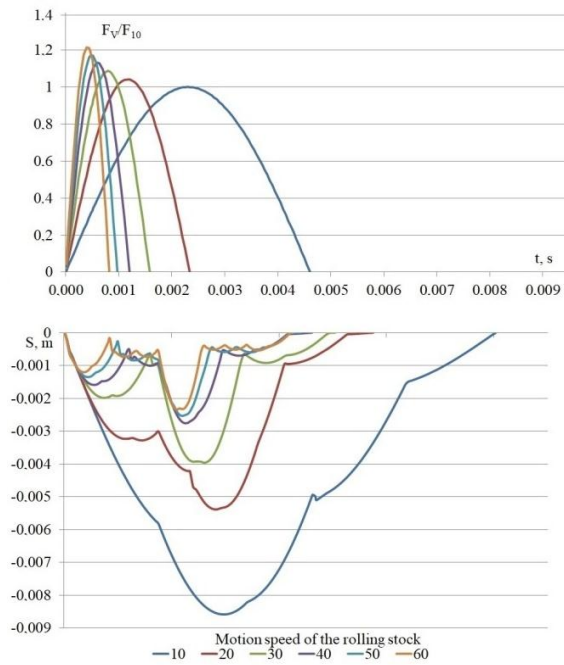


Fig. 2. The dependence of oscillation amplitudes of the trackform section in time with respect to different motion speeds under the impact on the section of single force $F = 225 \text{ kN}$

The dependences of oscillation amplitudes of trackform section in time for various motion speeds under the single force impact on the section are shown in Fig. 4 and 5, which are similar to Fig. 2. The difference in diagrams is caused by the difference in force values having an effect on the track. With increase in action force, the direct variation of dependences of oscillation amplitudes of trackform section in time is not traced in diagrams. The form of oscillations changes together with the change in oscillation amplitudes. The form of oscillation towards the direction of force impact propagation changes in propagation time and is connected with the correlation between the force action time and the time of deformability process propagation in the trackform elements.

The number of energy transferred by the wave is proportional to the square of oscillation amplitudes. The change in energy occurs due to the following conditions: a) changes in oscillation characteristics towards directions of wave propagation; b) changes

second constituent. With increase in motion speed, we may observe the increase in temporary delay value between the time of impact on the trackform and the time when deformability occurs.

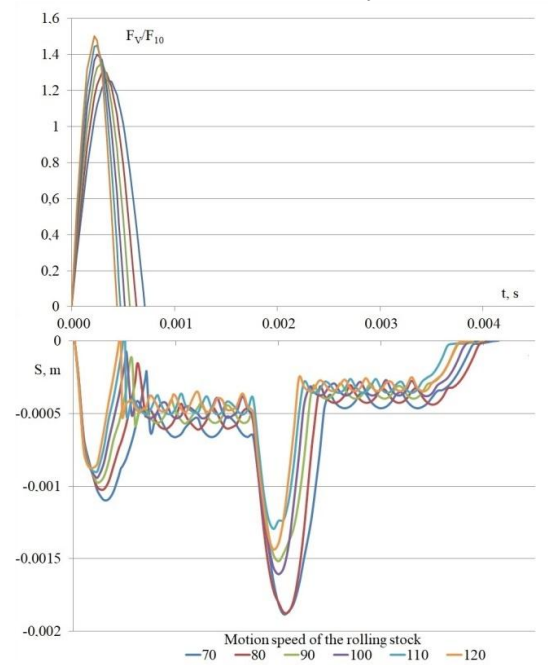


Fig. 3. The dependence of oscillation amplitudes of the trackform section in time with respect to different motion speeds under the impact on the section of single force $F = 225 \text{ kN}$

in oscillation characteristics with respect to the wave properties during their transition from one element to the other; c) friction forces in the very oscillation propagation medium; d) friction forces arising during interaction of element contact pairs. For the same trackform and with the same-type force action, the change in energy occurs due to condition a; the rest of conditions change proportionally to the change in force. This condition a preconditioned the change in the depth of trackform required for taking up a load. Conditions b, c, d are changing the form of dependences only in case of changing the trackform. However, condition b is decisive for choosing the number of elements and characteristics of element materials in the trackform.

The aforesaid shows that the change in power loads and motion speeds of the rolling stock directly affects the process of track deformability. This process is one of the main factors for the formation of dynamic track irregularities which

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

serve as disturbance effect for forming the three-dimensional vibrations of the rolling stock. Each variety of trackform has its own time of force impact propagation in the trackform elements. The change in number of trackform elements, stress-strain properties, geometrical and inertial characteristics of the trackform elements can cause the change in time of propagation of the deformability process. Therefore, we can trace the interdependence of the rolling stock dynamics and the process of track deformability.

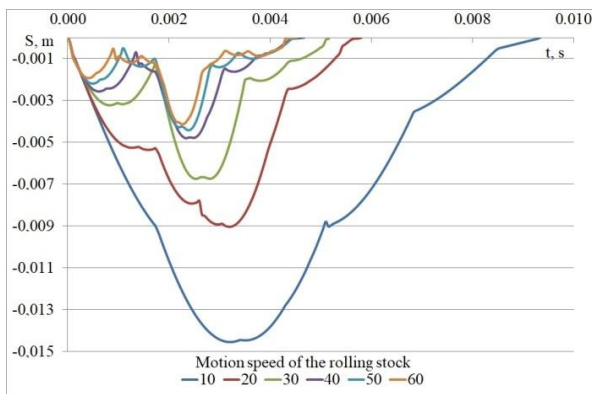


Fig. 4. The dependence of oscillation amplitudes of the trackform section in time with respect to different motion speeds under the impact on the section of single force $F = 294 \text{ kN}$

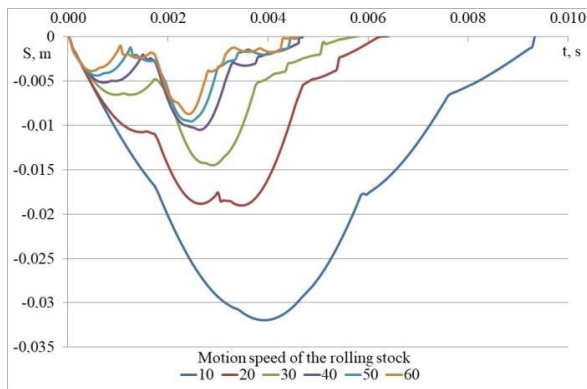


Fig. 5. The dependence of oscillation amplitudes of the trackform section in time with respect to different motion speeds under the impact on the section of single force $F = 450 \text{ kN}$

The track deformability is accompanied by the trackform element work to take up the force impacts from the rolling stock and to react to this impact. Each element engages in the process of deformability from the moment the force waves begin impacting on it. Each element has its own

time of propagation and transformation of force waves which is conditioned by the stress-strain properties and geometrical characteristics of the material. The trackform structure characterizes the time of direct presence of force waves in the trackform elements. Therefore, there exists the time when the element directly takes and transforms force impacts, and the time when the element becomes deformed due to deformations and shifts of the other elements. In other words, the structure elements can work «actively» (by transforming the force impacts) and «passively».

For the purpose of evaluating the operation of the above structure elements, we calculated the dependences of oscillation amplitudes of the elements and trackform section in time for various motion speeds during single force movement (wheel motion). Table 3 shows the relationship between the values of the deformability behavior of the elements and the trackform at various motion speeds.

Table 3

Deformability behavior ratios at various motion speeds

$V, \text{ km/h}$	structure	pad	sleeper	ballast	ground base
$V, \text{ km/h} \quad A_V / A_{V=10}$					
10	1	1	1	1	1
30	0.17	0.18	0.09	0.469	0.134
60	0.03	0.08	0.03	0.121	0.044
90	0.02	0.07	0.02	0.055	0.025
120	0.01	0.06	0.01	0.044	0.018
$I_V / I_{V=10}$					
10	1	1	1	1	1
30	0.487	0.513	0.255	1.088	0.391
60	0.159	0.498	0.159	0.679	0.245
90	0.141	0.565	0.129	0.444	0.202
120	0.133	0.655	0.117	0.466	0.184

Following the results of data analysis given in Table 3, at lower motion speeds, the values of trackform amplitudes and load impact time exceed

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

the similar values at higher motion speeds but the load-receiving track length is shorter. It results in different deformability behavior ratios at various motion speeds. The evaluation of the trackform and elements work intensity during the time of load action characterizes the trackform and elements work intensity at various motion speeds. The increase in motion speeds results in the intensity of using the rail pads and railway ballast due to increased load-receiving track length against the background of total decrease in the intensity of using the trackform.

Table 4 shows the relationship between the values of the deformability behavior of the elements and the trackform at various loads.

Table 4

**Deformability behavior ratios
at various loads**

Object	load		
	225 kN	294 kN	450 kN
$A_F / A_{F=264}$			
structures	1	2.21–2.34	7.1–7.63
pad	1	2.02–2.25	5.67–7.03
sleeper	1	2.17–2.19	6.25–6.83
ballast	1	2.18–2.43	6.49–8.13
ground base	1	2.18–2.48	6.42–6.85
$I_F / I_{F=264}$			
structures	1	2.01–2.13	5.79–6.02
pad	1	1.83–2.06	4.47–5.57
sleeper	1	1.90–2.00	4.94–5.38
ballast	1	1.94–2.73	5.07–7.7
ground base	1	1.98–2.25	5.06–6.63

Following the results of data analysis given in Table 4, the railway track, under the influence of the rolling stock having the load of 225 kN, performs less work than the track having the loads

of 294 kN and 450 kN respectively by 2.24 and 6.16 times. The intensity of using the elements and trackform having the loads of 225 kN is less than that of the tracks having the load of 294 kN and 450 kN respectively by 2.08 and 5.66 times. It allows establishing the interdependences of the rolling stock dynamics and the intensity of using the railway track elements.

The use of proposed evaluation parameters of deformability behavior will further allow us to define the effect of the aggregate change in the states of elements on the trackform operation and, in compliance with the current requirements for the trackform and its maintenance, to form the set of evaluation data of the track state in terms of acceptable deviations in the trackform elements.

Originality and practical value

Trackform and parameters of the elements of the track superstructure and substructure can be described using the railway tracks deformability behavior. In the future this conclusion will help to increase the efficiency of the dynamic properties of rolling stock when designing and provide availability of the infrastructure during operation. Changes in the regulatory framework of rail transport in recent years provide for the observance of its functional safety, therefore, the question of the need to assess the impact of rolling stock on the way to be regarded as a dynamic process which must be taken into account track deformability resistance. This study provides a basis which takes into account the stiffness of deformation to allow forming the regulatory framework for functional safety of railway track in Ukraine.

Conclusion

The paper presents the investigation of deformability parameters of the railway track under various operating conditions as the initial data for forming the forced oscillations of a rolling stock and the intensity of using the elements of a trackform. In paper, the theoretical provisions are proposed, and new analytical dependences of mutual influence of railway rolling stock and railway track are determined.

It is found that the ratio between the work intensity value of the elements and the trackform, as criteria for deformability behavior, may be used

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

as the evaluation parameters of the functionally safe operation of the track. The given parameters will serve as the basis for classifying the critical track states when it is expedient to repair and maintain the track to ensure the required level of trackform use efficiency during its service life.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бондаренко, І. О. Моделювання з метою встановлення оціночних умов функціональної безпеки залізничної колії / І. О. Бондаренко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2016. – Т. 1, № 7 (79). – С. 4–10. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59874>
2. Татарінова, В. А. Теоретичні дослідження руху одиниці рухомого складу / В. А. Татарінова, Л. О. Недужа // *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. – 2018. – № 16. – С. 121–126.
3. An analytical mathematical method for calculation of the dynamic wheel-rail impact force caused by wheel flat / M. Bogdevicius, R. Zygiene, G. Bureika, S. Dailydka // *Vehicle system dynamics*. – 2016. – Vol. 54. – Iss. 5. – P. 689–705. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2016.1153114>
4. Bondarenko, I. Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work / I. Bondarenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 7 (84). – P. 28–36. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85464>
5. Comparison of simplified and complete contact modeling approaches in simulations of high adhesion locomotives / M. Spiryagin, I. Persson, E. A. H. Vollebregt, C. Cole // *Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks : Proceedings of the 25th International Symposium (14–18 August 2017, Rockhampton, Queensland, Australia)*. – London, 2017. – Vol. 2. – P. 613–619.
6. Derailment risk and dynamics of railway vehicles in curved tracks: Analysis of the effect of failed fasteners / S. Morales-Ivorra, J. I. Real, C. Hernández, L. Montalbán // *Journal of Modern Transportation*. – 2016. – Vol. 24. – Iss. 1. – P. 38–47. doi: <http://doi.org/10.1007/s40534-015-0093-z>
7. Development of the procedure for verifying the feasibility of designing an active suspension system for transport carriages / N. Ershova, I. Bondarenko, O. Shibko, N. Velmagina // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 3. – Iss. 7 (93). – P. 53–63. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131534>
8. Dynamic Track Irregularities Modeling when Studying Rolling Stock Dynamics / I. Bondarenko, R. Keršys, O. Lunys, L. Neduzha // *Proc. of 23rd Intern. Sci. Conf. (October 2–4, 2019) / Kaunas University of Technology*. – Palanga, 2019.
9. Facchinetti, A. Rolling Stock Dynamic Evaluation by Means of Laboratory Tests / A. Facchinetti, S. Bruni, W. Zhang // *Intern. Journal of Railway Technology*. – 2013. – Vol. 2. – Iss. 4. – P. 99–123. doi: <http://doi.org/10.4203/ijrt.2.4.6>
10. Heat capacity and heat transfer coefficient estimation for a dynamic thermal model of rail vehicles / R. N. Hofstädter, T. Zero, C. Dullinger, G. Richter, M. Kozek // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. – 2017. – Vol. 23. – Iss. 5. – P. 439–452. doi: <http://doi.org/10.1080/13873954.2016.1263670>
11. Impact of maintenance conditions of vehicle components on the vehicle–track interaction loads / N. Kuka, R. Verardi, C. Ariaudo, J. Pombo // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2018. – Vol. 232. – Iss. 15. – P. 2626–2641. doi: <http://doi.org/10.1177/0954406217722803>
12. Kalivoda, J. Enhancing the scientific level of engineering training of railway transport professionals / J. Kalivoda, L. O. Neduzha // *Наука та прогрес транспорту*. – 2017. – № 6 (72). – С. 128–137. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2017/119050>
13. Kalivoda, J. Simulation of Safety Against Derailment Tests of an Electric Locomotive / J. Kalivoda, L. Neduzha // *Engineering Mechanics 2019 : Proc. of 25th Intern. Conf. (Svratka, Czech Republic, 13–16 May 2019)*. – Svratka, 2019. – P. 177–180. doi: <https://doi.org/10.21495/71-0-177>
14. Kraft, S. An approach for the validation of railway vehicle models based on on-track measurements / S. Kraft, J. Causse, F. Coudert // *Vehicle System Dynamics*. – 2015. – Vol. 232. – Iss. 10. – P. 1480–1499. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2015.1054406>

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

15. Kyryl'chuk, O. High Speed Stability of a Railway Vehicle Equipped with Independently Rotating Wheels / O. Kyryl'chuk, J. Kalivoda, L. Neduzha // *Engineering Mechanics 2018 : Proc. of 24th Intern. Conf. (Svratka, Czech Republic, May 14–17, 2018)*. – Svratka, 2018. – P. 473–476. doi: <https://doi.org/10.21495/91-8-473>
16. Mathematical and Computer Models in Estimation of Dynamic Processes of Vehicles / A. Assemkhanuly, Z. Niyazova, R. Ustemirova, A. Karpov, A. Muratov, K. Kaspakbayev // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2019. – Vol. 97, No 10. – P. 2803–2820.
17. Modelling, simulation and applications of longitudinal train dynamics / C. Cole, M. Spiryagin, Q. Wu, Y. Q. Sun // *Vehicle System Dynamics*. – 2017. – Vol. 55. – Iss. 10. – P. 1498–1571. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1330484>
18. Research of Lateral Vibrations of a Passenger Wagon Running Along the Curved Path / R. Skvireckas, A. Keršys, R. Keršys, V. Lukoševičius // *Journal of Vibroengineering*. – 2012. – Vol. 14. – Iss. 2. – P. 706–714.
19. Sichani, M. S. A fast wheel–rail contact model for application to damage analysis in vehicle dynamics simulation / M. S. Sichani, R. Enblom, M. Berg // *Wear*. – 2016. – Vol. 366-367. – P. 123–130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.015>
20. Simplified and advanced modelling of traction control systems of heavy-haul locomotives / M. Spiryagin, P. Wolfs, F. Szanto, C. Cole // *Vehicle System Dynamics*. – 2015. – Vol. 53. – Iss. 5. – P. 672–691. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1008016>
21. Tatarinova, V. A. Research of Locomotive Mechanics Behavior / V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha // *Наука та прогрес транспорту*. – 2018. – № 5 (77). – С. 104–114. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/148026>
22. Theoretical foundations for conceptually new rolling stock modules : monograph / M. I. Gorbunov, O. V. Fomin, V. V. Kovalenko, R. Y. Domin. – Sievierodonetsk : Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018. – 100 p.
23. Wu, Q. Longitudinal train dynamics: an overview / Q. Wu, M. Spiryagin, C. Cole // *Vehicle System Dynamics*. – 2016. – Vol. 54. – Iss. 12. – P. 1688–1714. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988>

I. O. БОНДАРЕНКО^{1*}, Л. О. НЕДУЖА^{2*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, ел. пошта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{2*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, ел. пошта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІКИ РУХОМОГО СКЛАДУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ КОЛІЇ

Мета. Основною метою цієї роботи є дослідження параметрів деформованості залізничної колії за різних експлуатаційних умов як вихідних даних для формування вимушених коливань рухомого складу й інтенсивності використання елементів конструкції колії. **Методика.** Для дослідження було розроблено оригінальну модель конструкції колії, описану з використанням основних понять теорій пружності й поширення пружних хвиль. **Результати.** Установлено, що співвідношення між інтенсивністю роботи елементів і конструкцією колії як критерієм деформованості можна використати як оціночний параметр функціонально безпечної експлуатації колії. Це може бути основою для класифікації критичних станів конструкцій колії за яких необхідно проводити роботи з відновлення її працездатності, щоб забезпечити необхідний рівень ефективності використання конструкції протягом терміну служби. **Наукова новизна.** Конструкція колії й параметри елементів її верхньої та нижньої будов можуть бути описані з використанням поведінки деформованості. Надалі цей висновок допоможе підвищити ефективність динамічних властивостей рухомого складу під час проектування й забезпечити готовність інфраструктури під час експлуатації. **Практична значимість.** Зміни в нормативно-правовій базі залізничного транспорту за останні роки передбачають дотримання його функціональної безпеки. Тому

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

питання про необхідність оцінки впливу рухомого складу на колію слід розглядати як динамічний процес, який повинен брати до уваги опір деформованості колії. Це дослідження становить основу для обліку жорсткості деформації, що дозволяє сформувати нормативну базу для гарантування функціональної безпеки залізничної колії в Україні.

Ключові слова: конструкція колії; параметри деформованості; коливання; деформованість залізничної колії

И. А. БОНДАРЕНКО^{1*}, Л. А. НЕДУЖАЯ^{2*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, эл. почта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{2*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, эл. почта lhorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ

Цель. Основной целью данной работы является исследование параметров деформированности железнодорожного пути при различных эксплуатационных условиях в качестве исходных данных для формирования вынужденных колебаний подвижного состава и интенсивности использования элементов конструкции пути. **Методика.** Для исследования была разработана оригинальная модель конструкции пути, описанная с использованием основных положений теорий упругости и распространения упругих волн. **Результаты.** Установлено, что соотношения между интенсивностью работы элементов и конструкцией пути как критерием деформированности можно использовать в качестве оценочного параметра функционально безопасной эксплуатации пути. Это может быть основой для классификации критических состояний конструкций пути, при которых необходимо проводить работы по восстановлению его работоспособности, чтобы обеспечить необходимый уровень эффективности использования конструкции в течение срока службы. **Научная новизна.** Конструкция пути и параметры элементов его верхнего и нижнего строений могут быть описаны с использованием поведения деформированности. В дальнейшем этот вывод поможет повысить эффективность динамических свойств подвижного состава при проектировании и обеспечить готовность инфраструктуры во время эксплуатации. **Практическая значимость.** Изменения в нормативно-правовой базе железнодорожного транспорта в последние годы предусматривают соблюдение его функциональной безопасности. Поэтому вопрос о необходимости оценки влияния подвижного состава на путь следует рассматривать как динамический процесс, который должен принимать во внимание сопротивление деформированности пути. Это исследование обеспечивает основу для учета жесткости деформации, что позволяет сформировать нормативную базу для обеспечения функциональной безопасности железнодорожного пути в Украине.

Ключевые слова: конструкция пути; параметры деформированности; колебания; деформированность железнодорожного пути

REFERENCES

1. Bondarenko, I. O. (2016). Modeling for establishment of evaluation conditions of functional safety of the railway track. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7(79), 4-10. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59874> (in Ukrainian)
2. Tatarinova, V., & Neduzha, L. (2018). Theoretical Research of the Traction Vehicle Motion. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 16, 121-126. (in Ukrainian)
3. Bogdevicius, M., Zygiene, R., Bureika, G., & Dailydka, S. (2016). An analytical mathematical method for calculation of the dynamic wheel-rail impact force caused by wheel flat. *Vehicle System Dynamics*, 54(5), 689-705. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2016.1153114> (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

4. Bondarenko, I. (2016). Development of algorithm for calculating dynamic processes of railroad track deformability work. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7(84), 28-36. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85464> (in English)
5. Spiryagin, M., Persson, I., Vollebregt, E. A. H., & Cole, C. (2017). Comparison of simplified and complete contact modelling approaches in simulations of high adhesion locomotives. *Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. Vol. 2: Proceedings of the 25th International Symposium*, (pp. 613-619). London. (in English)
6. Morales-Ivorra, S., Real, J. I., Hernández, C., & Montalbán, L. (2016). Derailment risk and dynamics of railway vehicles in curved tracks: Analysis of the effect of failed fasteners. *Journal of Modern Transportation*, 24(1), 38-47. doi: <http://doi.org/10.1007/s40534-015-0093-z> (in English)
7. Ershova, N., Bondarenko, I., Shibko, O., & Velmagina, N. (2018). Development of the procedure for verifying the feasibility of designing an active suspension system for transport carriages. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/7(93), 53-63. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131534> (in English)
8. Bondarenko, I., Keršys, R., Lunys, O., & Neduzha, L. (2019). Dynamic Track Irregularities Modeling when Studying Rolling Stock Dynamics. *Proceedings of 23rd International Scientific Conference (October 2–4, 2019)*. Palanga. (in English)
9. Facchinetti, A., Bruni, S., & Zhang, W. (2013). Rolling Stock Dynamic Evaluation by Means of Laboratory Tests. *International Journal of Railway Technology*, 2(4), 99-123. doi: <http://doi.org/10.4203/ijrt.2.4.6> (in English)
10. Hofstädter, R. N., Zero, T., Dullinger, C., Richter, G., & Kozek, M. (2016). Heat capacity and heat transfer coefficient estimation for a dynamic thermal model of rail vehicles. *Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems*, 23(5), 439-452. doi: <http://doi.org/10.1080/13873954.2016.1263670> (in English)
11. Kuka, N., Verardi, R., Ariaudo, C., & Pombo, J. (2018). Impact of maintenance conditions of vehicle components on the vehicle–track interaction loads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(15), 2626-2641. doi: <http://doi.org/10.1177/0954406217722803> (in English)
12. Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2017). Enhancing the Scientific Level of Engineering Training of Railway Transport Professionals. *Science and Transport Progress*, 6(72), 128-137. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2017/119050> (in English)
13. Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2019). *Simulation of Safety Against Derailment Tests of an Electric Locomotive, Engineering Mechanics 2019: Proc. of 25th Intern. Conf.*, 177-180. Svratka. doi: <https://doi.org/10.21495/71-0-177> (in English)
14. Kraft, S., Causse, J., & Coudert, F. (2015). An approach for the validation of railway vehicle models based on on-track measurements. *Vehicle System Dynamics*, 53(10), 1480-1499. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2015.1054406> (in English)
15. Kyryl'chuk, O., Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2018). *High speed stability of a railway vehicle equipped with independently rotating wheels, Engineering Mechanics 2018: Proc. of 24th Intern Conf.* Svratka. doi: <https://doi.org/10.21495/91-8-473> (in English)
16. Assemkhanuly, A., Niyazova, Z., Ustemirova, R., Karpov, A., Muratov, A., & Kaspakbayev, K. (2019). Mathematical and Computer Models in Estimation of Dynamic Processes of Vehicles. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 97(10), 2803-2820 (in English)
17. Cole, C., Spiryagin, M., Wu, Q., & Sun, Y. Q. (2017). Modelling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 55(10), 1498-1571. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1330484> (in English)
18. Skvireckas, R., Keršys, A., Keršys, R., & Lukoševičius, V. (2012). Research of Lateral Vibrations of a Passenger Wagon Running Along the Curved Path. *Journal of Vibroengineering*, 14(2), 706-714. (in English)
19. Sichani, M. S., Enblom, R., & Berg, M. (2016). A fast wheel–rail contact model for application to damage analysis in vehicle dynamics simulation. *Wear*, 366-367, 123-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.015> (in English)
20. Spiryagin, M., Wolfs, P., Szanto, F., & Cole, C. (2015). Simplified and advanced modelling of traction control systems of heavy-haul locomotives. *Vehicle System Dynamics*, 53(5), 672-691. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1008016> (in English)
21. Tatarinova, V. A., Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2018). Research of Locomotive Mechanics Behavior. *Science and Transport Progress*, 5(77), 104-114. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/148026> (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

22. Gorbunov, M. I, Fomin, O. V, Kovalenko, V. V., & Domin, R. Y. (2018). *Theoretical foundations for conceptually new rolling stock modules: monograph*. Sievierodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. (in English)
23. Wu, Q., Spiryagin, M., & Cole, C. (2016). Longitudinal train dynamics: an overview. *Vehicle System Dynamics*, 54(12), 1688-1714. doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988> (in English)

Received: March 11, 2019

Accepted: July 08, 2019

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 519.71:330.322.54

Z. M. GASANOV^{1*}

^{1*}Dep. «Applied Mathematics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 36, e-mail zakariya@ukr.net, ORCID 0000-0002-2312-8053

MODELING THE OPTIMIZATION PROCESS OF INVESTMENTS IN DEVELOPMENT OF THE ENTERPRISE TAKING INTO ACCOUNT RANDOM COSTS

Purpose. The study aims at substantiating the method to determine the optimal volume of investments for improving basic economic indicators of the enterprise's performance selected by the company management at random costs at each stage of its development. **Methodology.** The proposed methodology for determining the optimal investment volume is based on simulation modeling methods and optimal control theory, in particular, the dynamic programming procedure, since the controlled process of the enterprise's development is a multi-step one. Using step-by-step planning with generation of costs for transitions and statistical processing of results, a solution to optimization problem was obtained, to which the methods of mathematical analysis cannot be applied. **Findings.** An algorithm has been developed for calculating the minimal volume of capital investments for improving selected economic indicators and constructing the optimal trajectory for the enterprise's development from the initial economic state to the final desired state. This takes into account unforeseen intermediate costs in the process of enterprise development. **Originality.** It is shown that using the methods of the theory of optimal control and simulation modeling, it is possible to calculate the minimal amount of capital investments to improve the selected economic indicators that determine the efficiency of the enterprise performance, taking into account the random costs of intermediate transitions by the development stages. Such calculation does not depend on the specific content of economic indicators. **Practical value.** The proposed methodology for calculating the minimal volume of capital investments is quite simple, but at the same time it allows, on the one hand, determining the priority areas of the enterprise's investment activities. On the other hand, it increases the manageability and transparency of the enterprise's economic activity, and increases the manager's confidence in the correctness of the decisions made.

Keywords: optimal control; simulation modeling; economic indicators; efficiency; optimal investment volume; optimization; competitiveness; manageability; dynamic programming, optimal trajectory, random costs

Introduction

The main economic indicators of reflect the results and success of the enterprise performance. On the other hand, the effective activity of the enterprise in the long term, ensuring high rates of its development and increasing competitiveness is largely determined by its investment level and the range of investment activities [1, 2, 6].

Investment activity depends on many factors. For example, on the distribution of the income received to increase working capital, improve vari-

ous profitability, consumption and savings indicators. In conditions of low per capita incomes, most of them are spent for consumption. The growth of income increases their share, aimed at savings, which serve as a source of investment resources. Consequently, increase in the share of savings causes a corresponding increase in the volume of investments and vice versa. Also, the expected net profit margin has a significant influence on the investment volume. This is due to the fact that profit is the main incentive for investments. The

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

higher the expected net profit margin, the correspondingly higher will be the volume of investments, and vice versa [3–5, 7].

As you know [6–8], before starting investment, you need to perform a set of work to justify the effectiveness of investments in the enterprise, called the investment project. Investment project preparation is a lengthy and sometimes very expensive process consisting of a number of acts and stages [1, 2, 6, 7, 9–13].

The main goal of investment project aimed for the enterprise development, as a rule, is to increase net profit and profitability ratios, therefore, increase its efficiency to the desired level. Consequently, one of the stages of its preparation can be the determination of the optimal (minimal) volume of investments. The methodology for solving this problem using the methods of optimal control theory [4, 5] is given in the works [3, 8].

Let us note that the solution to this problem is significantly complicated at unforeseen (random) costs at the stages of enterprise development. Therefore, the methodology developed in the works [3, 8] is not applicable in this case. This work is a continuation of the work [8]. It provides an algorithm for determining the optimal (minimum) volume of investment at random costs according to the stages of enterprise development, developed on the basis of simulation modeling methods.

Purpose

The main goal of this study is to substantiate the method for determining the optimal volume of investments for improving basic economic indicators of the enterprise's performance selected by the company management at random costs at each stage of its development.

Methodology

Let

$$a_{i,j} = a_{i \rightarrow i+1,j}; \quad b_{i,j} = b_{i,j \rightarrow j+1};$$

$$c_{i,j} = c_{i \rightarrow i+1,j \rightarrow j+1}$$

the costs for transitions from the level (P_i, R_j) of profit values and the profitability ratio to the levels (P_{i+1}, R_j) , (P_i, R_{j+1}) , (P_{i+1}, R_{j+1}) , where

$i = 0, 1, \dots, N_k$; $j = 0, 1, \dots, M_k$, are the number of calculation steps, respectively, and the calculation step is a month, quarter or year. These costs can be calculated using the so-called discounting method, i.e. reduction the incomes obtained at different times and expenses incurred within the framework of the investment project to a single (base) time point [6, 7]. All calculations are carried out in announced, target and estimated prices.

In this paper, we give a methodology for calculating the minimal volume of investments to achieve the set values of P_k – net profit and R_k – profitability ratio of the enterprise with unforeseen (random) costs at each stage of enterprise's development, i.e. when the values

$$a_{i \rightarrow i+1,j}, \quad b_{i,j \rightarrow j+1}, \quad c_{i \rightarrow i+1,j \rightarrow j+1}$$

are random with given distribution laws.

The basis of the proposed methodology is the procedure of dynamic programming and simulation modeling [4, 5]. This procedure, using step-by-step planning, allows not only to simplify the solution of optimization problems, but also to solve those to which the methods of mathematical analysis cannot be applied.

The procedure for optimizing the volume of investments with known transition costs

$$a_{i \rightarrow i+1,j}; \quad b_{i,j \rightarrow j+1}; \quad c_{i \rightarrow i+1,j \rightarrow j+1}$$

is given in the author's paper [8].

According to this procedure, the process of making an investment decision starts with the last k -th step. At this step, one chooses a solution that makes it possible to get the greatest effect (reaching the final level (P_k, R_k) with the minimal investment volume). After planning this step, one can add the penultimate $(k-1)$ -th step, to which, in turn, add the $(k-2)$ -th, etc.

In order to plan the k -th step, one must know the level (P, R) of the enterprise at the $(k-1)$ -th step. If the level of the enterprise (P, R) at the $(k-1)$ -th step is unknown, then all sorts of levels are considered at this step. For each possible level, one chooses the so-called sub-optimal decision at the last, k -th step.

Let it be planned k -th step investment process and $(P_{k-1,1}, R_{k-1,1})$,

$$(P_{k-1,2}, R_{k-1,2}), \dots, (P_{k-1,r}, R_{k-1,r})$$

are possible levels at the $(k-1)$ -th step. At the last step, we find a sub-optimal decision for each of them. Thus, the k -th step is planned. Indeed, whatever the level (P, R) at the penultimate step, it is already known which solution should be applied at the last step. We proceed similarly at the $(k-1)$ -th step, but we have to choose the sub-optimal decisions taking into account the ones that have already been chosen at the k -th step, etc. As a result, we come to the initial level (P_0, R_0) of net profit and profitability ratio.

For the first step, we do not make any assumptions about the possible level (P, R) , since the level (P_0, R_0) is known, and we find the optimal solution, taking into account all sub-optimal decisions found for the second step. Going from (P_0, R_0) to (P_k, R_k) , we obtain the desired optimal decision, which ensures the minimal volume of investments and their best distribution according to calculation steps.

A model example is given in the work [8], which demonstrates the efficiency of this procedure.

Often, in practice, the values of parameter (transition costs)

$$a_{i,j} = a_{i \rightarrow i+1,j}, \quad b_{i,j} = b_{i,j \rightarrow j+1},$$

$$c_{i,j} = c_{i \rightarrow i+1,j \rightarrow j+1}$$

are random ones. In particular, they can be determined using formulas

$$a_{i,j} = \alpha_{i,j} a_{i,j}^0, \quad b_{i,j} = \beta_{i,j} b_{i,j}^0,$$

$$c_{i,j} = \sigma_{i,j} c_{i,j}^0,$$

where

$$\alpha_{i,j} \in [\alpha_{i,j}^1, \alpha_{i,j}^2], \quad \beta_{i,j} \in [\beta_{i,j}^1, \beta_{i,j}^2],$$

$$\sigma_{i,j} \in [\sigma_{i,j}^1, \sigma_{i,j}^2]$$

– random correction factors for transition costs with given distribution laws, $a_{i,j}^0, b_{i,j}^0, c_{i,j}^0$ – basic values of transition costs for this sector of the economy. Parameters $a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j}, d_{i,j}, e_{i,j}, f_{i,j}$ can be determined with the help of statistical anal-

ysis of changes in prices for products and services, force majeure circumstances (including, for example, changes in legislation related to the economy).

Thus, by one going from (P_0, R_0) to (P_k, R_k) we will not get the optimal decision, which ensures the minimal volume of investments and their best distribution according to the calculation steps, due to the randomness of the transition costs.

In this paper, to solve this problem, it is proposed to use simulation methods, namely, the Monte Carlo method. The essence of this method is as follows. Let X_1, X_2, \dots, X_n be the random input parameters with the given distribution laws, and Y is the output parameter of the system:

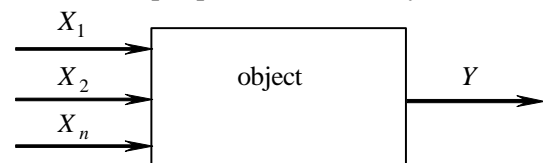


Fig. 1. The structural diagram of the object operation

It is assumed that the type (law) of dependence of Y parameter on the input parameters is known (Fig. 1):

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

Algorithmically simulation model of the object functioning process is a software implementation of formula (1) by generating random variables X_1, X_2, \dots, X_n .

In our case, input parameters are the transition costs

$$a_{i,j} = \alpha_{i,j} a_{i,j}^0, \quad b_{i,j} = \beta_{i,j} b_{i,j}^0,$$

$$c_{i,j} = \sigma_{i,j} c_{i,j}^0,$$

Y – is minimal investment volume calculated using the procedure of the dynamic programming method (function F), which is described in the work [8].

Findings

According to this algorithm, it is convenient to search for the optimal decision (transition) from (P_0, R_0) to (P_k, R_k) geometrically on the POR plane, or rather, on the rectangle bounded with right lines

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$P = P_0, P = P_k, R = R_0, R = R_k$$

which is the area of acceptable levels. The initial (P_0, R_0) and final (P_k, R_k) levels are well defined as two points of the plane (Fig. 2) [1].

In Fig. 2, vertical segments show increase in profitability ratio at a constant profit value, horizontal segments show increase in profit at a constant value of profitability ratio, and diagonal segments show simultaneous increase in profit and profitability ratio.

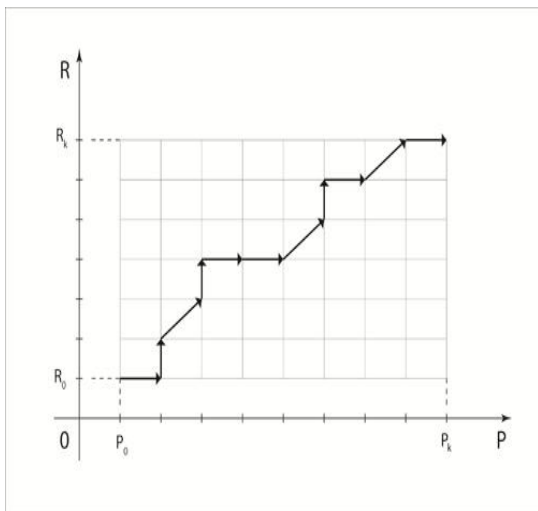


Fig. 2. Optimal trajectory of enterprise development

For each set of generated transition costs,

$$a_{i,j} = \alpha_{i,j} a_{i,j}^0; \quad b_{i,j} = \beta_{i,j} b_{i,j}^0; \quad c_{i,j} = \sigma_{i,j} c_{i,j}^0;$$

according to the above procedure, its own optimal transition trajectory T from (P_0, R_0) to (P_k, R_k) is constructed and the minimal volume of investments Y is calculated.

The simulation model of the decision-making process on the investment volume and the optimal trajectory of enterprise's development is being software implemented according to the following macroalgorithm:

Step 1. Determination and input of basic values

$$a_{i,j}^0, b_{i,j}^0, c_{i,j}^0, \alpha_{i,j}^1, \alpha_{i,j}^2, \beta_{i,j}^1, \beta_{i,j}^2, \sigma_{i,j}^1, \sigma_{i,j}^2,$$

and the number of experiments (simulation model starts up) M .

Step 2. The generation of random variables $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \sigma_{i,j}$. If they are evenly distributed, then the generation can be performed according to the following formulas

$$\alpha_{i,j} = (\alpha_{i,j}^2 - \alpha_{i,j}^1) \text{random} + \alpha_{i,j}^1$$

$$\beta_{i,j} = (\beta_{i,j}^2 - \beta_{i,j}^1) \text{random} + \beta_{i,j}^1$$

$$\sigma_{i,j} = (\sigma_{i,j}^2 - \sigma_{i,j}^1) \text{random} + \sigma_{i,j}^1$$

In the case of normal distribution, the following formulas for random number generation can be applied

$$\alpha_{i,j} = \sqrt{D(\alpha_{i,j})} \left(\sum_{i=1}^n z_i - \frac{n}{2} \right) / \sqrt{\frac{n}{12}} + M(\alpha_{i,j}),$$

$$\beta_{i,j} = \sqrt{D(\beta_{i,j})} \left(\sum_{i=1}^n z_i - \frac{n}{2} \right) / \sqrt{\frac{n}{12}} + M(\beta_{i,j}),$$

$$\sigma_{i,j} = \sqrt{D(\sigma_{i,j})} \left(\sum_{i=1}^n z_i - \frac{n}{2} \right) / \sqrt{\frac{n}{12}} + M(\sigma_{i,j}),$$

where $D(\cdot)$, $M(\cdot)$ are dispersion and mathematical expectation of a random variable accordingly, z_1, z_2, \dots, z_n are uniformly distributed random variables from the interval $[0, 1]$, $k \geq 12$.

Step 3. The construction of the optimal transition trajectory T from (P_0, R_0) to (P_k, R_k) and the calculation of the minimal volume of investments Y for a given set of generated transition costs.

As noted in the work [8], if for a certain nodal point (see Fig. 2) there are several (two or three) sub-optimal decisions, then all of them are marked with arrows, and then any of them is selected. In these cases, the problem has several solutions if such nodal points belong to the optimal trajectory. In other words, the minimal volume of investments obtained for a given set of generated cost values can be spent using several transition trajectories T from (P_0, R_0) to (P_k, R_k) .

Step 4. Repeating steps 2 and 3 M times and interval alignment of the obtained statistical material in the form of a table

Table 1

Results of computational experiments	
Y	$(Y_s^1, Y_s^2), s=1, \dots, m,$
Trajectory frequency T	$N_s, s=1, \dots, m$

Number m – the number of intervals, which is determined by the Sturges formula

$$m = 1 + 3.3 \cdot \lg M .$$

The length h of the interval (Y_i^1, Y_i^2) is determined by the formula

$$h = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{m} ,$$

where Y_{\max}, Y_{\min} – are the maximum and minimum values of the parameter Y obtained as a result of experiments.

In Table 1 N_s – the number of trajectories for which $Y \in (Y_s^1, Y_s^2)$.

Step 5. Average values calculation

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y}{M} .$$

Obviously, at some value $s = s^* \in [1, m]$ $\bar{Y} \in (Y_{s^*}^1, Y_{s^*}^2)$. several trajectories T of the enterprise development may correspond to the interval $(Y_{s^*}^1, Y_{s^*}^2)$. The enterprise management can choose from them a specific, most convenient way of development from the implementation point of view.

Originality and practical value

It is shown that, using the methods of optimal control theory and simulation modeling, it is possible to calculate the minimal value of capital investments to improve the selected economic indicators, which determine the efficiency of the enterprise at random costs for intermediate transitions by the development stages.

The technique proposed in the article is quite simple, but at the same time it allows, on the one hand, determining the priority directions of the enterprise's investment activity. On the other hand, it increases the controllability and transparency of the enterprise's economic activity, increases the manager's confidence in the correctness of decisions made [8].

Conclusions

The proposed calculation method does not depend on the specific content of economic indicators. The result depends on the accuracy of determining the distribution laws of random variables $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \sigma_{i,j}$ using the methods of mathematical statistics. And this, in turn, depends on the quality of the statistical analysis of the specifics of the enterprise's economic activity.

Let us note that the above calculation algorithm can be applied to any pair of economic performance indicators of any enterprise, including the enterprise connected with railway [1, 2, 8].

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вечканов, Г. Инвестиции: объемы, динамика, структура / Г. Вечканов // Экономист. – 2012. – № 3. – С. 16–28.
2. Гайдук, Н. О. Оновлення рухомого складу як пріоритетний напрямок інвестиційної діяльності «Укрзалізниці» / Н. О. Гайдук, О. М. Пшінько // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 35. – С. 219–222.
3. Гасанов, З. М. Моделирование процесса оптимизации инвестиций на развитие предприятия при случайных затратах / З. М. Гасанов // Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті : тези XI Міжнар. наук.-практ. конф. (13–14 груд. 2017 р.). – Дніпро, 2017. – С. 29.
4. Кузнецов, Ю. Н. Математическое программирование / Ю. Н. Кузнецов, В. И. Кузубов, А. Б. Волощенко. – Москва : Высшая школа, 1976. – 352 с.
5. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – Москва : Наука, 1976. – 392 с.
6. Теплова, Т. В. Инвестиции : учебник / Т. В. Теплова. – Москва : Юрайт, 2011. – 724 с.
7. Arif, F. Decision Support Framework for Infrastructure Maintenance Investment Decision Making / F. Arif, M. E. Bayraktar, A. G. Chowdhury // Journal of Management in Engineering. – 2016. – Vol. 32. – Iss. 1. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000372](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000372)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

8. Gasanov, Z. M. About optimizing of investment volumes to improve the basic indicators of there enterprise effectiveness / Z. M. Gasanov // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 122–128. doi: <http://doi.org/10.15802/stp.2015/38258>
9. Guo, M.-W. Evaluation of profit variable weight of risk investment enterprises financial profit of risk investment projects based on set pair theory / M.-W. Guo // Wuhan Ligong Daxue Xuebao / Journal of Wuhan University of Technology. – 2010. – Vol. 32. – Iss. 3. – P. 147–150.
10. Kuhn, D. Stochastic Optimization of Investment Planning Problems in the Electric Power Industry / D. Kuhn, P. Pappas, B. Rustem // Process Systems Engineering / E. N. Pistikopoulos, M. C. Georgiadis, V. Dua (Eds). – Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014. – P. 215–230. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527631209.ch48>
11. Sahin, M. A new mixed-integer linear programming formulation and particle swarm optimization based hybrid heuristic for the problem of resource investment and balancing of the assembly line with multi-manned workstations / M. Sahin, T. Kellegoz // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 133. – P. 107–120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.056>
12. Svensson, E. A model for optimization of process integration investments under uncertainty / E. Svensson, A.-B. Strömberg, M. Patriksson // Energy. – 2011. – Vol. 36. – Iss. 5. – P. 2733–2746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.013>
13. The optimization of investment strategy for resource utilization and energy conservation in iron mines based on Monte Carlo and intelligent computation / Y. He, N. Liao, J. Rao, F. Fu, Z. Chen // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 232. – P. 672–691. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.347>

3. М. ГАСАНОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладна математика», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 36, ел. пошта zakariya@ukr.net, ORCID 0000-0002-2312-8053

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПТИМІЗАЦІЇ ІНВЕСТИЦІЙ НА РОЗВИТОК ПІДПРИЄМСТВА З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВИХ ВИТРАТ

Мета. Основною метою цього дослідження є обґрунтування методу визначення оптимального обсягу інвестицій на поліпшення обраних керівництвом підприємства основних економічних показників ефективності його роботи за випадкових витрат на кожному етапі розвитку. **Методика.** В основі запропонованої методики визначення оптимального обсягу інвестицій лежать методи імітаційного моделювання й теорії оптимального управління, зокрема процедура динамічного програмування, оскільки керований процес розвитку підприємства є багатоетапним. Використання поетапного планування з генерацією витрат на переходи і статистичної обробки результатів дає можливість отримати розв'язок задачі оптимізації, до якої не можна застосувати методи математичного аналізу. **Результати.** Розроблено алгоритм розрахунку мінімального обсягу капітальних вкладень на поліпшення обраних економічних показників. Побудовано оптимальну траєкторію розвитку підприємства від початкового економічного до кінцевого бажаного стану. При цьому враховані непередбачені проміжні витрати в процесі розвитку підприємства. **Наукова новизна.** Показано, що за допомогою методів теорії оптимального управління та імітаційного моделювання можна розрахувати мінімальний обсяг капітальних вкладень на поліпшення обраних економічних показників, які визначають ефективність роботи підприємства з урахуванням випадкових витрат на проміжні переходи за етапами розвитку. Причому такий розрахунок не залежить від конкретного змісту економічних показників. **Практична значимість.** Запропонована в статті методика розрахунку мінімального обсягу капітальних вкладень досить проста, але водночас дозволяє, з одного боку, визначити пріоритетні напрямки інвестиційної діяльності підприємства, а з другого – підвищує керованість і прозорість господарської діяльності підприємства, упевненість керівника в правильності прийнятих рішень.

Ключові слова: оптимальне управління; імітаційне моделювання; економічні показники; ефективність роботи; оптимальний обсяг інвестицій; оптимізація; конкурентоспроможність; керованість; динамічне програмування; оптимальна траєкторія; випадкові витрати

З. М. ГАСАНОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладна математика», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 36, ел. пошта zakariya@ukr.net, ORCID 0000-0002-2312-8053

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПТИМИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИЙ НА РАЗВИТИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ЗАТРАТ

Цель. Основной целью данного исследования является обоснование метода определения оптимального объема инвестиций на улучшение выбираемых руководством предприятия основных экономических показателей эффективности его работы при случайных расходах на каждом этапе развития. **Методика.** В основе предлагаемой методики определения оптимального объема инвестиций лежат методы имитационного моделирования и теории оптимального управления, в частности процедура динамического программирования, так как управляемый процесс развития предприятия является многоэтапным. Использование поэтапного планирования с генерацией затрат на переходы и статистической обработки результатов дает возможность получить решение задачи оптимизации, к которой нельзя применить методы математического анализа. **Результаты.** Разработан алгоритм расчета минимального объема капитальных вложений на улучшение выбранных экономических показателей. Построена оптимальная траектория развития предприятия от начального экономического до конечного желаемого состояния. При этом учтены непредвиденные промежуточные расходы в процессе развития предприятия. **Научная новизна.** Показано, что с помощью методов теории оптимального управления и имитационного моделирования можно произвести расчет минимального объема капитальных вложений на улучшение выбранных экономических показателей, которые определяют эффективность работы предприятия с учетом случайных затрат на промежуточные переходы по этапам развития. Причём такой расчет не зависит от конкретного содержания экономических показателей. **Практическая значимость.** Предлагаемая в статье методика расчета минимального объема капитальных вложений довольно проста, но в то же время позволяет, с одной стороны, определить приоритетные направления инвестиционной деятельности предприятия, а с другой – повышает управляемость и прозрачность хозяйственной деятельности предприятия, уверенность руководителя в правильности принимаемых решений.

Ключевые слова: оптимальное управление; имитационное моделирование; экономические показатели; эффективность работы; оптимальный объем инвестиций; оптимизация; конкурентоспособность; управляемость; динамическое программирование; оптимальная траектория; случайные затраты

REFERENCES

1. Vechkanov, G. (2012). Investitsii: obemy, dinamika, struktura. *The Economist*, 3, 16-28. (in Russian)
2. Ghayduk, N. A., & Pshinko, O. M. (2010). Rolling Stock Renovation as the Priority of Ukrzaliznytsya's Investments. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 35, 219-222. (in Ukrainian)
3. Gasanov, Z. M. (2017). *Modelirovanie protsessa optimizatsii investitsiy na razvitie predpriyatiya pri sluchaynykh zatratakh. Abstracts of the XI International Scientific and Practical Conference «Modern Information and Communication Technologies in Transport, Industry and Education»*. Dnipro. (in Russian)
4. Kuznetsov, Y. N., Kuzubov, V. I., & Voloshchenko, A. B. (1976). *Matematicheskoe programmirovaniye*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
5. Pontryagin, L. S., Boltyanskiy, V. G., Gamkrelidze, R. V., & Mishchenko, Y. F. (1976). *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov*. Moscow: Nauka. (in Russian)
6. Teplova, T. V. (2011). *Investitsii: uchebnyk*. Moscow: Yurayt. (in Russian)
7. Arif, F., Bayraktar, M. E., & Chowdhury, A. G. (2016). Decision Support Framework for Infrastructure Maintenance Investment Decision Making. *Journal of Management in Engineering*, 32(1). doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000372](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000372) (in English)
8. Gasanov, Z. M. (2015). About optimizing of investment volumes to improve the basic indicators of there enterprise effectiveness. *Science and Transport Progress*, 1(55), 122-128. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2015/38258> (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

9. Guo, M.-W. (2010). Evaluation of profit variable weight of risk investment enterprises financial profit of risk investment projects based on set pair theory. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Journal of Wuhan University of Technology)*, 32(3), 147-150. (in English)
10. Kuhn, D., Parpas, P., & Rustem, B. (2014). Stochastic Optimization of Investment Planning Problems in the Electric Power Industry. In E. N. Pistikopoulos, M. C. Georgiadis, V. Dua (Eds), *Process Systems Engineering* (pp. 215-230). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527631209.ch48> (in English)
11. Şahin, M., & Kellegöz, T. (2019). A new mixed-integer linear programming formulation and particle swarm optimization based hybrid heuristic for the problem of resource investment and balancing of the assembly line with multi-manned workstations. *Computers & Industrial Engineering*, 133, 107-120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.056> (in English)
12. Svensson, E., Strömberg, A.-B., & Patriksson, M. (2011). A model for optimization of process integration investments under uncertainty. *Energy*, 36(5), 2733-2746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.013> (in English)
13. He, Y., Liao, N., Rao, J., Fu, F., & Chen, Z. (2019). The optimization of investment strategy for resource utilization and energy conservation in iron mines based on Monte Carlo and intelligent computation. *Journal of Cleaner Production*, 232, 672-691. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.347> (in English)

Received: March 06, 2019

Accepted: July 01, 2019

UDC 625(001)A. ROZANDI^{1*}, M. AGUSTIEN², J. ARLIANSYAH³^{1*}Dep. «Civil Engineering», University of Sriwijaya, Bukit Besar, Jl. Padang Selasa No. 524, Bukit Lama, Kec. Ilir Bar. I, Kota Palembang, Indonesia, 30139, tel. +(62) 711 354 222, e-mail ardinrozandi888@yahoo.com, ORCID 0000-0002-6127-9434²Dep. «Civil Engineering», University of Sriwijaya, Bukit Besar, Jl. Padang Selasa No. 524, Bukit Lama, Kec. Ilir Bar. I, Kota Palembang, Indonesia, 30139, tel. +(62) 711 354 222, e-mail melawaty74@gmail.com, ORCID 0000-0003-4518-1856³Dep. «Civil Engineering», University of Sriwijaya, Bukit Besar, Jl. Padang Selasa No. 524, Bukit Lama, Kec. Ilir Bar. I, Kota Palembang, Indonesia, 30139, tel. +(62) 711 354 222, e-mail joniarliansyah@yahoo.com, ORCID 0000-0002-6239-4370**THE ANALYSIS OF TRAVEL CHARACTERISTICS AND THE SCHOOL BUS PROVISION PLAN BASED ON STUDENTS' TRANSPORTATION MODE**

Purpose. This study was conducted to obtain the characteristics of respondents and travel modes that are still dominated among private vehicle users. **Methodology.** This analysis was done using Microsoft excel and SPSS Ver. 25 for Windows. **Findings.** The results showed that the factors affecting the use of transportation modes for students journeys at one time to and from school are as follows: a) sex (X1), b) age (X2), c) monthly pocket money (X3), d) distance (X6), e) long trips departure (X7), f) leave travel expenses (X8), g) the frequency of the return trip (X10), h) the distance of the return trip (X11), i) the long way home (X12) and j) the cost for going home (X13). The opportunity of providing school bus may get good responses because the students would prefer to choose a mass transportation integrated with the school and giving good service, safety, less cost and its affectivity. In fact, it is not only in pedestrian offenders who have close travel distance and short-time travel of leaving for school and back home. **Originality.** There have been many studies discussing public transportation. However, this study limits only in discussing the use of school bus regarding students' transport modes. **Practical value.** Generally, this study contributes positive outputs in some aspects, such as: economics, management and safety. Indeed, the existence of school bus will help students who have some difficulties, including distance, economical problem and so on.

Keywords: transport modes; characteristic of travel; school bus plan; public service

Introduction

With a growing population resulted in an increasing number of transport movements, it is interesting to do further research on the behavior of an undertaken journey. Hence, this study will discuss the movement's intention in the world of education, especially the use of transport modes. Nowadays, a lot of researches on transportation have been done. Students have a variety of trips using the mode of transportation and it is used as a part of college activity [1].

The characteristics of a journey undertaken by university students are very important to be an issue of the research because it can affect the performance improvement of roads, especially in the city of Palembang in a particular time. This will become an issue in the future if no solution was carried out. Government efforts were to regulate the movement of university students in education in Palembang, like students' clustering in the area

surrounding the neighborhood, but they were not very effective in solving the problem for the long term, because still many students use private vehicles as a means to and from school. Moreover, students currently have started to travel more independently.

Then, students currently begin to experience changes in their activity as a stand-alone activity other than the fulfillment of educational activities [2]. Therefore, there exist needs to be another attempt to suppress the student movement as the availability of school buses which helps students to undertake the learning activities should be supported by good accessibility. The ease of getting transportation is to facilitate university students in traveling to and from school [3]. However, one should take into consideration factors in the environment that such as socio-economic factors related to the characteristics of the trip and the use and accessibility mode will be examined as long as you want to plan an adequate mass transportation like bus.

In the connection with this study, the presence of State Senior High School (SMA Negeri) 10 Palembang located on the road Sri Jaya country has diverse student residence and creates the need for increased mobility of modes transportation to and from school. It needs a deep research on the journey undertaken by students by means of surveying directly using interview techniques in the form of a questionnaire distributed to the students as the object of study. It is done to obtain the characteristics of user behavior mode of students' travel at SMAN 10 Palembang, factors that affect the perceptions of students when bus transportation is provided for students at SMAN 10 Palembang.

The purposes of this study are as follows: a) to obtain characteristics of respondents and transportation mode of students in SMAN 10 Palembang, b) to identify the factors that affect the modes of transportation on students of SMAN 10 Palembang, and c) to identify the perception of students at SMAN 10 Palembang of the school bus plan.

In addition, Agustien (2015) observed the scheduling time over working time in the city of Palembang whose respondents are workers with fixed working hours and activities such as shopping activities, social activities and entertainment. The observed activity time schedule is divided into three time periods *before*, *at work* and *after work*. The analysis was performed using questionnaire formed by the stated preference method assuming a combination of changes in travel time. The results showed that the utility of the activity is influenced by the types of undertaken activities [4].

According to a research of Tri Basuki Joewono et al. (2014), there is a difference in motorcycles and cars in terms of distance and travel time. The decision of choosing transport modes was influenced by sex, time, and frequency. As the frequency of travel and financial capability affect the time on trips of the students.

According to Juliane Stark who examined the travel patterns of four high school students in Austria and Germany, discovered that their mobility behavior is analyzed by looking at the diary of a journey undertaken to obtain the travel characteristics of the mode by Structural Equation Modeling (SEM) and nonlinear binary response variables to assess the effect of factors on the choice of travel mode. The results showed that the capital selection

of children was affected by the length of the trip and the quality of service of motorized modes [5].

The system model representing a person's activity and associated travel as patterns of activity goes beyond one trip. The ride was set as the movement patterns of students' home to one or more locations of activities and back home again. The research results obtained time, travel destinations, travel models are influenced by patterns of activity, whereas the activity itself influenced maximum utility pattern of travel alternatives available [6].

Samira Dibaj et al. (2016) showed different statistical analyses adjusted for data survey; data includes demographic characteristics and travel. In addition to the descriptive analysis of the data, the Poisson regression model and linear regression model have been developed in a number of student activities within a day. Because AUT located in the CBD area of Tehran and for two different traffic restrictions for private cars in this area, this study confirms that walking and public transport are the dominant mode among students AUT and only 4% of students use private cars. The model suggests that off-campus students were more likely to have a lot of activities compared to the students on campus [7].

This study will be limited to conduct research for the correspondent for whom the use of school bus transportation modes is planned, namely tenth grade and eleventh grade students of SMA Negeri 10 Palembang. The identification of problems was seen from the situation and condition which was then used as the questionnaire. The survey results will be used in obtaining the descriptive characteristics of the mode of transportation for students of SMA Negeri 10 Palembang on school days and hours. The user behavior of students in terms of travel modes includes statistical characteristics of travel and the movement of students at SMAN 10 Palembang to school and from school. The data obtained will be analyzed using Ms. Excel with the help of SPSS Ver. 25 for windows.

Mode of Transportation

The definition of the mode of transportation is a transport that gives mobility for the object to a certain movement. While public transport is a mean to help the transport of people or a group of

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

people together. Transport can also be used as a means of delivery from the origin place to the desired destination area.

According to the classification, shuttles are divided into two, namely:

1. Public Transportation.

Definition of public transport according to Law No. 14 of 1992, freight traffic on the road, chapters 25 and 26, states the user is charged a transport fee due to the services used for private purposes. On the concept of public transportation, not all society have personal transportation to support daily activities, thus the government provides public transport as the form of their public policy [8].

2. Personal Transport.

Personal transportation is a privately owned transport. In private mode, the owners can freely determine the nature of traveling and the tracks themselves [9]. On daily activities, the use of private transport modes is exploited. This is caused by several factors including the main factors related to the driver's personal modes such as comfort, security, flexibility, and others.

Factors affecting Mode Selection

According to Tamin (2000), the factors affecting the choice of transportation mode can be grouped into four categories [10]:

1. Characteristics of Road Users.

On the road, the users' characteristics greatly influence the modal choice such as availability or personal vehicles, household structure, income,

and factors including other factors such as mandatory use of personal modes of the motor to the institute of education/school and pick-up purposes.

2. Feature Movement.

The movement as the timing of the movement, the movement destination, a travel distance to the destination becomes factors affecting modal choice.

3. Feature Facility Transportation Modes.

It can be grouped into two categories, as follows:

- Quantitative factors such as travel time, transportation costs (fares, fuel, and other costs).

- Qualitative factors are quite difficult to quantify include comfort, safety, reliability, regularity, and others.

4. Feature town or zone.

It means that the distance from a zone or downtown population density can affect the modal choice. Therefore, a good model of modal choice must consider all these factors. It can be said that of all models of modal choice, the selection of independent variables used are very dependent on the person who chooses the model along with the type of model used and the purpose of the movement itself.

So, all the influential factors in the choice of transport mode and an understanding of how the factors influence one other can be illustrated in the figure 1 below.

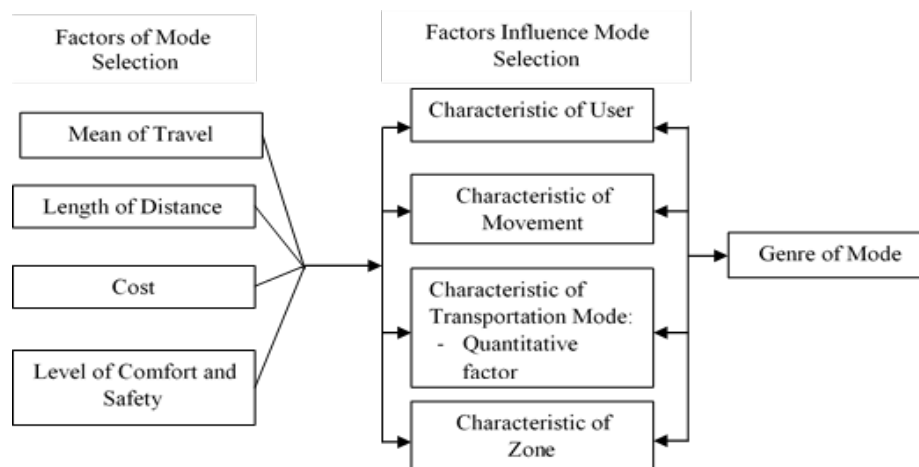


Fig 1. The Factors of Determining Transport Mode

Based on the figure displayed above, the instigator of a trip in the transportation planning process is analogously depicted as people who choose to conduct movable and immovable activities. If the movable activity is selected, then people will decide the transport modes or keep moving on foot. When the user selects the mode, the user is required to choose between two options namely, private transport or public transport.

Methodology

This research uses descriptive quantitative approach. To determine the amount of data surveyed, the first step is done using SPSS Ver. 25 for windows as a descriptive statistical analysis. The next stage determining the characteristics of the user modes with different variables will be analyzed by means of cross-tabulation (crosstab).

The chi-square is applied to determine whether there is or not a variable attachment relationship between the X variable (dependent) and Y (independent) [11]. The calculating value of chi-square that is obtained from the data analysis will be compared with chi-square value tables that have become consensus whether the dependent variable affects the other existing variables.

To know how significant the dependent variables to independent variables, they should meet the significance value (probability). After that, the comparison of those variables will show whether the probability value obtained from the results of data analysis using SPSS Ver. 25 for windows senses significantly to the existing provisions of probability value. In the significance, the test uses variables value with confidence level $> 95\%$. In other words, the significance value is < 0.05 . If in an equation that one of variables has a significant value greater than 0.05 , the equation cannot be used.

In this study, chi-square analysis serves as a statistical technique used to obtain the factors that influence the use of student travel mode of SMA Negeri 10 Palembang. To test data using a list of questions or a questionnaire in this study is an indicator of the perception of students at SMAN 10 Palembang in analyzing the chances of student bus plan. It is necessary to validate reliability testing on the item such questionnaire, so it can determine if the survey form is feasible and can be used

in analyzing the perception of students on school bus opportunities based on the use of modes of transportation.

Results and Discussion. Testing Crosstab

The test is performed in order to analyze the effect of reliance free variable with the dependent variable. The dependent variable in this study is the mode of transportation used by students of SMAN 10 Palembang in travel. The independent variables are gender, age, pocket money per month, settlement/residence, frequency of trips departure, distance of trips departure, long trips departure, travel expenses departure, activity trips departure, the frequency of the return trip, the distance the return journey, a long journey home, the cost of the return trip, and the activities of the return journey. This stage will be analyzed using SPSS Ver. 25, and the data will be processed by cross-tabulation or crosstab to view dependency to obtain the effect of variables.

Chi-Square Analysis of Mode Usage

The analysis in this research is the analysis of Chi-Square. This analysis is used to find the relationship testing modes of transportation used by SMA Negeri 10 Palembang students at a time to and from school with the independent variables obtained by performing the alignment test whether the observed variables are in accordance with the conditions set. The following table analyzes Chi-Square test variable dependency-free with the dependent variable that can be seen chi-square value in the table 1 below.

With the initial hypothesis (H_0) considered that each independent variable (independent variable) is considered to have no effect on the dependent variable (dependent variable), and based on the test results by comparing the calculating chi-square and chi-square table, it can be seen that the initial hypothesis (H_0) for the variable consists of gender, age, monthly pocket money, settlement/residence, frequency of trips departure, distance of trips departure, long trips departure, travel expenses departure, activity trips departure, the frequency of the return trip, the distance the return journey, a long journey home, travel costs home, and the activities of the return journey. Thus, these variables of sex (H_1), age (H_2), monthly pocket money (H_3), dis-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

tance of trips departure (H_6), long trips departure (H_7), travel expenses departure (H_8), the frequency of the return trip (H_{10}), the distance of the return trip (H_{11}), the long way home (H_{12}), the cost of the return trip (H_{13}) is rejected. It means that these variables affect the variable use of modes of transport trips to school and back home carried out by students of SMAN 10 Palembang.

Table 1

Variable Value of Mode

Variable	Chi Square (Calculate)	Chi Square (Table)	Means of Conclusion
Sex (X_1)	13.233	7.81	H_0 rejected
Age (X_2)	29.896	21.03	H_0 rejected
Monthly Pocket Money (X_3)	62.601	12.59	H_0 rejected
Settlement/Residence (X_4)	43.000	43.77	H_0 accepted
Frequency of Trip Departure (X_5)	4.046	7.81	H_0 accepted
Distance of Trip Departure (X_6)	24.458	21.03	H_0 rejected
Length of Trip Departure (X_7)	30.469	21.03	H_0 rejected
Travel Expenses Departure (X_8)	46.829	12.59	H_0 rejected
Activity of Trip Departure (X_9)	4.046	7.81	H_0 accepted
Frequency of Return Trip (X_{10})	13.404	7.81	H_0 rejected
Distance of Return Journey (X_{11})	29.443	16.92	H_0 rejected
Long Way Home (X_{12})	38.155	21.03	H_0 rejected
Cost of Return Trip (X_{13})	106.916	16.92	H_0 rejected
Activity of Return Trip (X_{14})	14.850	21.03	H_0 accepted

Source: Primary Data

It can be seen by analyzing the calculation result that value of chi-square is greater than the value of chi-square table (chi-square test), and chi-square table $\rightarrow H_0$ is rejected. It means that there is a relationship which may affect independent variables and the dependent variable, while the initial hypothesis (H_0) for the variable «settlement/residence», «frequency of trips departure», «the activity of the trip departure», and «the activity of the return trip» was accepted. It means that those variables do not have influence of determining the transport modes.

The Analysis of Significance Value of Mode Usage

After knowing the chi-square value based on the analysis results and provision chi-square table that has been set, the next step was observing the significant value variable (independent variable on the dependent variable) consisting of gender, age, pocket money per month, settlement/residence, frequency of trips departure, distance of trips departure, long trips departure, travel expenses departure, activity trips departure, the frequency of the return trip, the distance the return journey, a long journey home, the cost of the return trip, and the activities of the return trip on the use of modes of transport. In the process of analyzing the significance of value, cross-tabulation mode is used to the variable to be tested and to observe how the variable entanglement with the conditions is set. The following probability value analysis results obtained with SPSS for Windows version 25, and which has a consensus that can be seen in Table 2 below.

At Table 2, it can be seen that the results of the analysis of significant value are tested. It is known that if the value of the significance is below $\alpha 0.05$, the studied variables are said significant, but if the value of the significance is above $\alpha 0.05$, the studies variables are not significant. Based on the test, it shows that the variables of gender, age, pocket money per month, the traveling distance set off, long trips departure, travel expenses set out, the frequency of the return trip, the distance the return journey, a long journey home and the cost of the return trip is a variable having a significant value that can influence the behavior of the mode of travel used by students of SMAN 10 Palembang to

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

see the standard of provision of significance α value 0.05 which is smaller than the value obtained from the analysis.

Table 2

Significant Value of Variables

Variable	α	Probability	Note
Sex (X_1)	0.004	0.05	Significant
Age (X_2)	0.003	0.05	Significant
Monthly Pocket Money (X_3)	0.000	0.05	Significant
Settlement/Residence (X_4)	0.059	0.05	Not Significant
Frequency of Trip Departure (X_5)	0.257	0.05	Not Significant
Distance of Trip Departure (X_6)	0.018	0.05	Significant
Length of Trip Departure (X_7)	0.002	0.05	Significant
Travel Expenses Departure (X_8)	0.000	0.05	Significant
Activity of Trip Departure (X_9)	0.257	0.05	Not Significant
Frequency of Return Trip (X_{10})	0.004	0.05	Significant
Distance of Return Journey (X_{11})	0.001	0.05	Significant
Long Way Home (X_{12})	0.000	0.05	Significant
Cost of Return Trip (X_{13})	0.000	0.05	Significant
Activity of Return Trip (X_{14})	0.250	0.05	Not Significant

Source: Primary Data

Besides, it indicates that $\alpha 0.05 >$ is the significance value obtained, the H_0 is rejected. It means that between independent variables and the de-

pendent variable there is a correlation or influence. While variable residence, frequency of trips departure, travel activity to school and return home activity have no correlation or influence on the travel behavior of the student mode. It indicates that the test analysis results significant value greater than the standard provisions exist α significance value of 0.05, so that indicates H_0 has no correlation or influence on independent variables with the dependent variable. The frequency of trips departure, travel activity to school and return home activity have no correlation or influence on the travel behavior of students' mode.

The test analysis results showed that significant value is greater than the standard provisions of significance value that has been set which was $\alpha 0.05$. Therefore, it indicates H_0 has no attachment or influence of independent variables with the dependent variable. The frequency of trips departure, travel activity goes to school and return home activity have no attachment or influence on the travel behavior of the students' mode.

Opportunity Selection Student Bus Transportation

Based on the data summarized and analyzed to determine service and facilities of students' bus, the following ratings desired service of students transport mode was being simulated to utilize bus as mode of students' behavior at SMA Negeri 10 Palembang can be seen in Table 3 below.

The table above showed those students whose trip to and from school by public transport have bigger possibility of utilizing the school bus existence. The average value is known in the public transport modes by 4.73%. It indicates that respondents whose daily travels to school use public transport enable the transition to the school bus, while the smallest of the average value is the use of the car and pedestrians at 3.66. It shows the lack of the respondents' interest to use the school bus. The school bus that cannot accommodate the students' various need, especially those whose way home and to school is by cars influence their desire not to pick school bus. However, comfort, safety, cost, time travel and school schedule become the most influential factor variables that make students pick the school bus.

Table 3

The Assessment of Respondents toward Services and Facilities Based on the Transport Modes

Items of Variable	Score				Average
	Car	Motor-cycle	Public Transportation	Pedestrian	
The Service of School Bus	3.81	4.12	4.77	4.10	4.20
The Transition of School Bus	3.06	3.65	4.95	3.87	3.88
Travel time of School Bus	3.63	3.88	4.41	4.00	3.98
Schedule of School Bus	3.25	3.62	4.05	3.83	3.65
Cost of School Bus	3.94	4.24	5.00	3.7	4.22
Passenger's Safety	4.00	4.59	5.00	3.93	4.38
Passenger's Comfort	4.00	4.68	5.00	3.88	4.39
Average	3.66	4.11	4.73	3.92	

Source: Primary Data

Originality and Practical Value

There have been many studies discussing public transportation. However, this study limits only in discussing the use of school bus regarding students' transport modes. Generally, this study contributes positive outputs in some aspects, such as: economic, management and safety. Indeed, the existence of school bus will help students who have some difficulties, including distance, economical problem and so on.

Conclusions

Based on the survey conducted and the results of data processing, it has been identified that the characteristics of respondents are dominated by motorcycles users with 46.7% female, 32% were aged 16 years, 43.7% have monthly pocket money of <IDR. 750.000, – and 49.3% reside in the district of Ilir Barat 1. While the characteristics of trip to school and return home is dominated by the motorcycle at a leaving distance of 58.7% and return for 55.3% in the range of the travel distance of 0.1 to 4 kilometers, travel time of leaving for is 41% and 35.7% for returning home in the range of travel time 2-10 minutes, the cost of leaving for is 67.67% and a 58.3% return in the range of IDR 0 –4000, and frequency of activity to school 71.7% and 64% return to home indicates that the most travel activity is simple trip without a stop other than the place of destination.

The factors that affect the use of modes of transport for students journeys at one time to and from school are as follows: a) sexes (X1), b) age (X2), c) monthly pocket money (X3), d) distance of trips departure (X6), e) long trips departure (X7), f) leave travel expenses (X8), g) the frequency of the return trip (X10), h) the distance of the return trip (X11), i) the long way home (X12) and j) cost journey home (X13).

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Activities and Daily Trips of University Student in a CBD area (case study: Amirkabir University of Technology / S. Dibaj, A. Golroo, M. Habibian, M. Hasani // *Transportation Research Procedia*. – 2017. – Vol. 25. – P. 2493–2496. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.278>
2. Adisasmita, R. *Manajemen Pembangunan Transportasi* / R. Adisasmita. – Yogyakarta : Penerbit Graha Ilmu, 2014. – 156 p.
3. An Analysis of Out-of-home Non-work Activity Time Use and Timing Behaviour Based on Work Schedule and Trip Time / M. Agustien, A. Sjafruddin, H. A. R. S. Lubis, S. S. Wibowo // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 125. – P. 504–511. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.044>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

4. Bowman, J. L. Activity-based Disaggregate Travel Demand Model System with Activity Schedules / J. L. Bowman, M. E. Ben-Akiva // Transportation Research, Part A: Policy and Practice. – 2001. – Vol. 35. – Iss. 1. – P. 1–28. doi: [https://doi.org/10.1016/s0965-8564\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/s0965-8564(99)00043-9)
5. Gunardo, R. B. Geografi Transportasi / R. B. Gunardo. – Yogyakarta : Penerbit Ombak, 2014. – 216 p.
6. Hobbs, W. Pengantar Metodologi Penelitian / W. Hobbs. – Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995. – 35 p.
7. Joewono, T. B. Eksplorasi Perjalanan Mahasiswa Terkait Kegiatan Kampus Berdasarkan Catatan Perjalanan / T. B. Joewono, M. Rizki // Jurnal Transportasi. – 2014. – Vol. 14, No. 2. – P. 117–126.
8. No Way to Go: Transport and Social Disadvantage in Australian Communities / Edited by G. Currie, Janet Stanley, John Stanley. – Clayton, Victoria, Australia : Monash Publishing, 2007. – 200 p.
9. Perencanaan & Pemodelan Transportasi / by O. Z. Tamin. – Bandung : Penerbit ITB Bandung, 2003. – 464 p.
10. The influence of external factors on children's travel mode: A comparison of school trips and non-school trips / J. Stark, I. B. Bartana, A. Fritz, W. Unbehaun, R. Hössinger // Journal Transport of Geography. – Vol. 68. – P. 50–52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.02.012>
11. Warpani, S. Merencanakan Sistem Perangkuta / S. Warpani. – Bandung : Penerbit ITB Bandung, 1990. – 191 p.

A. РОЗАНДІ^{1*}, М. АГУСТІЄН², Д. АРЛІАНСЯ³

^{1*}Каф. «Цивільне будівництво», Університет Шривіджаї, Букіт Бесар, Jl. Padang Selasa No. 524, Bukit Lama, Kec. Ilir Bar. I, Палембанг, Індонезія, 30139, тел. +(62) 711 354 222, ел. пошта ardinrozandi888@yahoo.com, ORCID 0000-0002-6127-9434

²Каф. «Цивільне будівництво», Університет Шривіджаї, Букіт Бесар, Jl. Padang Selasa No. 524, Bukit Lama, Kec. Ilir Bar. I, Палембанг, Індонезія, 30139, тел. +(62) 711 354 222, ел. пошта melawaty74@gmail.com, ORCID 0000-0003-4518-1856

³Каф. «Цивільне будівництво», Університет Шривіджаї, Букіт Бесар, Jl. Padang Selasa No. 524, Bukit Lama, Kec. Ilir Bar. I, Палембанг, Індонезія, 30139, тел. +62 711 354222, ел. пошта joniarliansyah@yahoo.com, ORCID 0000-0002-6239-4370

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОЇЗДОК УЧНІВ І МОЖЛИВОСТІ ЗДІЙСНЕННЯ ШКІЛЬНОГО АВТОБУСНОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Мета. Це дослідження було проведено з метою отримання показників респондентів (переважно серед приватних користувачів транспортних засобів) щодо способів їх пересування. **Методика.** Аналіз був виконаний з використанням Microsoft Excel і SPSS версії 25 для Windows. **Результати.** Отримані результати показали, що фактори, які впливають на використання видів транспорту для поїздок учнів в один час у школу й зі школи, такі: а) стать (X1); б) вік (X2); в) щомісячні кишенькові гроші (X3); г) відстань (X6); д) відправлення в далекі поїздки (X7); е) витрати на відрядження (X8); ж) частота зворотного рейсу (X10); з) відстань зворотного рейсу (X11); і) довгий шлях додому (X12) і к) вартість поїздки додому (X13). Можливість надання шкільного автобуса може отримати хороші відгуки, тому що учні вважатимуть за краще вибрати громадський транспорт, який інтегрований зі школою, гарантує якісне обслуговування, безпеку, меншу вартість і ефективність. Фактично це не стосується учнів, які проживають поблизу школи і можуть добиратися пішки, оскільки їхні поїздки в школу і назад додому є короткочасними. **Наукова новизна.** Було проведено багато досліджень з обговорення роботи громадського транспорту. Проте це дослідження обмежується лише розглядом можливості використання шкільного автобуса як транспортного засобу учнів. **Практична значимість.** Як правило, це дослідження дає позитивні результати в таких аспектах як економіка, управління й безпека. Насправді наявність шкільного автобуса допоможе учням, які мають труднощі з відстанню, обмежені в кишенькових грошах тощо.

Ключові слова: види транспорту; характеристика поїздок; план шкільного автобуса; громадська служба

А. РОЗАНДИ^{1*}, М. АГУСТИЕН², Д. АРЛІАНСЯ³

^{1*}Каф. «Гражданское строительство», Университет Шривиджая, Букит Бесар, Jl. Padang Selasa No. 524, Bukit Lama, Kec. Pliir Bar. I, Палембанг, Индонезия, 30139, тел. +(62) 711 354 222, эл. почта ardinrozandi888@yahoo.com, ORCID 0000-0002-6127-9434

²Каф. «Гражданское строительство», Университет Шривиджая, Букит Бесар, Jl. Padang Selasa No. 524, Bukit Lama, Kec. Pliir Bar. I, Палембанг, Индонезия, 30139, тел. +(62) 711 354 222, эл. почта melawaty74@gmail.com, ORCID 0000-0003-4518-1856

³Каф. «Гражданское строительство», Университет Шривиджая, Букит Бесар, Jl. Padang Selasa No.524, Bukit Lama, Kec. Pliir Bar. I, Палембанг, Индонезия, 30139, тел. +(62) 711 354 222, эл. почта joniarliansyah@yahoo.com, ORCID 0000-0002-6239-4370

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЕЗДОК УЧЕНИКОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ШКОЛЬНЫХ АВТОБУСНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Цель. Это исследование было проведено с целью получения показателей респондентов (преимущественно среди частных пользователей транспортных средств) по поводу способов их передвижения. **Методика.** Анализ был выполнен с использованием Microsoft Excel и SPSS версии 25 для Windows. **Результаты.** Полученные результаты показали, что факторы, влияющие на использование видов транспорта для поездок учащихся в одно время в школу и из школы, таковы: а) пол (X1); б) возраст (X2); в) ежемесячные карманные деньги (X3); г) расстояние (X6); д) отправления в дальние поездки (X7); е) командировочные расходы (X8); ж) частота обратного рейса (X10); з) расстояние обратного рейса (X11); и) долгий путь домой (X12) и к) стоимость поездки домой (X13). Возможность предоставления школьного автобуса может получить хорошие отклики, потому что ученики предпочитают выбрать общественный транспорт, который интегрирован со школой, гарантирует качественное обслуживание, безопасность, меньшую стоимость и эффективность. Фактически это не касается учеников, которые проживают вблизи школы и могут добираться пешком, поскольку их поездки в школу и обратно домой являются кратковременными. **Научная новизна.** Было проведено много исследований по обсуждению работы общественного транспорта. Тем не менее это исследование ограничивается только рассмотрением возможности использования школьного автобуса в качестве транспортного средства учащихся. **Практическая значимость.** Как правило, это исследование дает положительные результаты в таких аспектах как экономика, управление и безопасность. В действительности наличие школьного автобуса поможет учащимся, которые имеют трудности с расстоянием, ограничены в карманных деньгах и т. под.

Ключевые слова: виды транспорта; характеристика поездок; план школьного автобуса; общественная служба

REFERENCES

1. Dibaj, S., Golroo, A., Habibian, M., & Hasani, M. (2017). Activities and Daily trips of University Students in a CBD area (Case Study: Amirkabir University of Technology). *Transportation Research Procedia*, 25, 2490-2499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.278> (in English)
2. Adisasmitha, R. (2014). *Manajemen Pembangunan Transportasi*. Yogyakarta: Penerbit Graha Ilmu. (in Indonesian)
3. Agustien, M., Sjafruddin, A., Lubis, H. A. R. S., & Wibowo, S. S. (2015). An Analysis of Out-of-home Non-work Activity Time Use and Timing Behaviour Based on Work Schedule and Trip Time. *Procedia Engineering*, 125, 504-511. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.044> (in English)
4. Bowman, J., & Ben-Akiva, M. (2001). Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 35(1), 1-28. doi: [https://doi.org/10.1016/s0965-8564\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/s0965-8564(99)00043-9) (in English)
5. Gunardo, R. B. (2014). *Geografi Transportasi*. Yogyakarta: Penerbit Ombak. (in Indonesian)
6. Hobbs, W. (1995). *Pengantar Metodologi Penelitian*. Yogyakarta: Penerbit Ombak. (in Indonesian)
7. Joewono, T. B., & Rizki, M. (2014). Eksplorasi Perjalanan Mahasiswa Terkait Kegiatan Kampus Berdasarkan Catatan Perjalanan. *Jurnal Transportasi*, 14(2), 117-126. (in Indonesian)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

8. Currie, G., Stanley, Janet, & Stanley, John (Eds.). (2007). *No Way to Go: Transport and Social Disadvantage in Australian Communities*. Clayton, Victoria, Australia: Monash Publishing. (in English)
9. Tamin, O. Z. (Ed.). (2003). *Perencanaan & Pemodelan Transportasi*. Bandung: Penerbit ITB Bandung. (in Indonesian)
10. Stark, J., Bartana, I. B., Fritz, A., Unbehaun, W., & Hössinger, R. (2018). The influence of external factors on children's travel mode: A comparison of school trips and non-school trips. *Journal Transport of Geography*, 68(1), 50-52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.02.012> (in English)
11. Warpani, S. (1990). *Merencanakan Sistem Perangkuta*. Bandung: Penerbit ITB Bandung. (in Indonesian)

Received: Feb. 22, 2019

Accepted: July 01, 2019

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 691.714:621.785

В. В. КЛОЧИХІН¹, О. Б. МИЛОСЕРДОВ², О. С. ПОДОРОГА^{3*}, В. Г. МІЩЕНКО^{4*}

¹АТ «Мотор Січ», пр. Моторобудівників, 15, Запоріжжя, Україна, 69068, тел. +38 (061) 720 50 53, ел. пошта tb.ugmet@motorsich.com, ORCID 0000-0002-0754-5543

²ДП «Івченко–Прогрес», вул. Іванова, 2, Запоріжжя, Україна, 69068, тел. +38 (061) 720 64 03, ел. пошта 77@ivchenko-progress.com, ORCID 0000-0002-3914-3725

³*Каф. «Прикладна фізика і наноматеріали», Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, 69600, тел. +38 (068) 262 28 94, ел. пошта ospodoroha@outlook.com, ORCID 0000-0001-7543-1276

⁴*Каф. «Прикладна фізика і наноматеріали», Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, 69600, тел. +38 (061) 228 12 06, ел. пошта mishchen4@gmail.com, ORCID 0000-0003-0992-478X

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 09ХЗНМЗФБЧ ПІД ЧАС ХІМІКО-ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Мета. У роботі необхідно дослідити формування структурного стану нової сталі 09ХЗНМЗФБч після цементації й наступної термічної обробки та азотування. Визначити раціональний режим хіміко-термічного оброблення, який забезпечуватиме створення однорідного дифузійного шару й високі механічні та експлуатаційні характеристики. **Методика.** Хіміко-термічну обробку проводили на первинне й вторинне твердіння за чотирма варіантами з використанням печей SIEMENS і АСЕА. Азотування проводили у два етапи. Для виявлення мікроструктури сталі дослідно-промислового виробництва проводили травлення в 4-відсотковому розчині азотистої кислоти, металографічне дослідження проводили за перетином зразка на мікроскопі Axio Observer.D1m. Для визначення ефективної глибини дифузійних шарів після цементації й азотування вимірювали мікротвердість на приладі LECO LM248AT, а вимірювання гарячої твердості проводили на приладі Wilson Rockwell Hardness Tester. **Результати.** Для отримання однорідного структурного стану сталі 09ХЗНМЗФБч й максимальних результатів механічних та експлуатаційних характеристик проводили хіміко-термічну й термічну обробку за режимом: цементація за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год відпал за 650 °С, 5–7 год гартування від 1 030 °С з охолодженням у маслі, трикратне відпускання 530 °С, обробка холодом – 70 °С з витримкою 1 год 30 хв і наступне відпускання за 510 °С 1 год. Після цементації гартування проводили в інтервалі температур 1 000–1 030 °С для запобігання перенасичення робочого дифузійного шару й утворення карбідної сітки. Наступне трикратне відпускання 530 °С й обробка холодом – 70 °С впродовж 1 год 30 хв сприяли розпаду залишкового аустеніту й утворенню дрібнозернистого мартенситу відпускання. **Наукова новизна.** Розроблено раціональний режим хіміко-термічної й термічної обробки, який забезпечить максимальні механічні та експлуатаційні властивості сталі 09ХЗНМЗФБч завдяки заздалегідь визначеному співвідношенню структурних складових цементованого шару. **Практична значимість.** Апробований режим хіміко-термічної обробки багатокомпонентної легованої сталі 09ХЗНМЗФБч виробництва АТ «Мотор Січ» та ДП «Івченко–Прогрес», яка розроблена для зубчатих коліс авіаційних редукторів газотурбінних двигунів нового покоління, суттєво підвищує тепло- та енергонавантаження.

Ключові слова: мікроструктура; мартенсит; аустеніт; цементація; азотування; мікротвердість; твердість; границя міцності

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Вступ

Світовий прогрес літакобудування невинно диктує зростання вимог до властивостей матеріалів, які повинні забезпечувати одну з основних його складових – підвищення ресурсу газотурбінних двигунів. На сьогодні постала проблема підвищення потужності двигунів і, відповідно, збільшення обертового моменту авіаційних редукторів літаків за збереження їхньої маси та розмірів. Основні вимоги висувають до важко навантажених зубчастих коліс, які повинні працювати в умовах підвищених робочих температур до 450 °С [6, 11].

Найбільш відомі вітчизняні цементовані сталі 14ХГСН2МА (ДИ–3А), 16ХЗНВМФБ

(ВКС–5) вже давно застаріли та не відповідають сучасним вимогам щодо експлуатаційних характеристик [1, 4, 5].

Закордонний аналог сталь M50 NiL має високі показники механічних властивостей, проте за рахунок невиправдано високого легування вимагає складної хіміко-термічної обробки для отримання задовільної структури та властивостей [7, 9].

Співробітники кафедри прикладної фізики і наноматеріалів Запорізького національного університету (ЗНУ), ДП «Івченко–Прогрес», АТ «Мотор Січ» розробили нову цементовану вторинно-твердіючу сталь 09ХЗНМЗФБч з раціональним хімічним складом (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад цементованих сталей*

Table 1

Chemical composition of cemented steel*

№ з/п	Марка сталі	Вміст легувальних елементів, %									
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Ce(Al)
1	14ХГСН2МА (ДИ–3А)	0,14	0,8	0,6	1,4	1,8	0,35	–	≤0,06	–	–
2	16ХЗНВМФБ (ВКС–5)	0,16	0,5	0,5	2,8	1,2	0,5	1,2	0,5	0,15	0,04
3	M50 NiL	0,13	0,3	0,25	4,0	3,5	4,25	–	1,2	–	–
4	09ХЗНМЗФБч	0,1	0,48	0,34	2,9	1,44	2,99	–	0,33	0,3	0,0058 (0,05)

*Вміст P, S ≤ 0,025 %

Проведені авторами попередні дослідження з оптимізації хімічного складу [3, 10] сприяли збільшенню границі плинності нової сталі й підвищили контактну витривалість у 5 разів порівняно зі сталлю ВКС–5 [2].

Перевагою цементованої сталі 09ХЗНМЗФБч є висока теплостійкість – максимальна температура експлуатації сягає 450 °С, водночас у сталях 14ХГСН2МА (ДИ–3А) й 16ХЗНВМФБ (ВКС–5) вона не перевищує 180 та 300 °С відповідно [8, 11]. За рахунок оптимального легування розроблена сталь 09ХЗНМЗФБч має високі показники границі міцності (σ_b) та меншу твердість серцевини (39,5–40 HRC), що робить сталь більш техноло-

гічною до обробки різанням порівняно з M50 NiL (43–45 HRC).

Мета

Основна мета роботи полягає у виборі раціонального режиму хіміко-термічного (ХТО) й термічного (ТО), який забезпечуватиме формування однорідної структури й задовільні механічні властивості поверхневого робочого шару та серцевини сталі 09ХЗНМЗФБч.

Методика

Для дослідження структури й механічних властивостей дослідно-промислової партії сталі виготовлені прутки Ø 90 мм та поковки

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Ø 150 мм висотою 70 мм на ДП «УкрНДІспецталь». Дослідні сталі виготовляли у вакуумній індукційній печі з наступним вакуумним переплавленням в електродуговій печі.

Вхідний контроль, який провели в АТ «Мотор Січ», показав наступні результати механічних випробувань (табл. 2).

Для дослідження формування раціональної структури розроблені декілька режимів хіміко-термічного оброблення сталі промислового виробництва на первинне і вторинне твердіння (табл. 3).

Таблиця 2

Механічні властивості дослідно-промислової сталі 09X3NM3ФБч

Table 2

Mechanical properties of experimental and industrial steel 09Cr3NiMo3VNbr

№ зразка	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	HRC	KCU, Дж/см ²
Пруток Ø 90 мм	1 219...1 223	16,4...18,4	58,8...66,1	39,5...40	12...28
Поковка Ø 150 мм, висота 70 мм	1 243...1 309	16,0...18,4	56,6...64,1	39,5...41	15...17

Таблиця 3

Режими ХТО сталі 09X3NM3ФБч

Table 3

Types of thermochemical treatment of steel 09Cr3NiMo3VNbr

Варіант	Режим ХТО
1	Цементация за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год, відпал за 650 °С, 5–7 год, гартування від 900 °С з охолодженням в маслі, обробка холодом – 60 °С, відпускання за 250 °С
2	Цементация за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год, відпал за 650 °С, 5–7 год, гартування від 1 030 °С з охолодженням у маслі, трикратне відпускання за 530 °С
3	Цементация за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год, відпал за 650 °С, 5–7 год, гартування від 1 030 °С з охолодженням у маслі, п'ятикратне відпускання за 530 °С
4	Цементация за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год, відпал за 650 °С, 5–7 год, гартування від 1 030 °С з охолодженням у маслі, трикратне відпускання за 530 °С, обробка холодом –70 °С з витримкою 1 год 30 хв, відпускання за 510 °С, 1 год

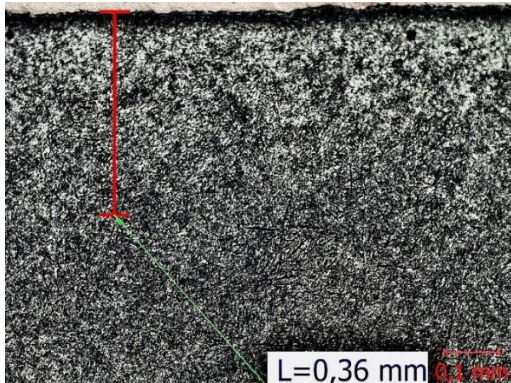
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ХТО проводили в печах SIEMENS і ACEA. Температуру й витримку під час цементації підбирали таким чином, щоб забезпечити необхідну товщину дифузійного шару 1,4–1,6 мм. Рідке азотування проводили у два етапи для забезпечення заданої товщини азотованого шару 0,5–0,7 мм. Перший етап азотування проводили за температури 520 °С, витримки 25 год, дисоціації 25–30 %, потім нагрівали до 540 °С з витримкою 35 год, дисоціацією 40–50 % і наступним деазотуванням 10 год. Дифузійне насичення у всіх варіантах проводили за технологією АТ «Мотор Січ» для конструкційних сталей мартенситного класу. Підготовлені шліфи пройшли травлення в 4-відсотковому водному розчині азотистої кислоти. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі Axio Observed.D1m за збільшень у 100 й 200. Для контролю якості дифузійних шарів і визначення міцності мікрооб'ємів дослідної сталі після цементації й азотування вимірювали мікротвердість на приладі LECO LM248AT.

Результати

Хіміко-термічне оброблення за варіантом 1 (табл. 3), який відповідав режиму гартування на

a – a



первинну твердість для сталі ВКС–5 [4, 8], сприяло отриманню глибини цементованого шару 1,53 мм.

Товщина поверхневого дифузійного шару становила лише 0,14 мм, що обумовлено низькою температурою гартування і, відповідно, уповільненим протіканням дифузійних процесів. Мікроструктура цементованого шару складала дрібногочастий мартенсит і значною кількістю надлишкових спеціальних карбідів овальної та стовпчастої форми, що свідчило про перенасичення поверхневого шару сталі вуглецем. Уздовж перетину зразка зустрічалися надлишкові спеціальні карбіди типу Me_7C_3 , Me_3C у вигляді поодиноких дисперсних фаз і карбідна сітка другого бала відповідно до ГОСТу 8233–56.

Після хіміко-термічної обробки за варіантом 2 (табл. 3), що відповідав ТУ У 27.1–00186536–005.2016 [3], глибина цементованого шару збільшилась до 1,6 мм. Поверхневий дифузійний шар також збільшився у 2,5 рази порівняно з попереднім режимом ХТО і становив 0,36 мм. Мікроструктура відповідала крупногочастому мартенситу й залишковому аустеніту до 30 % (рис. 1, *a*, *б*).

б – б



Рис. 1. Мікроструктура дифузійного шару сталі після режиму ХТО (варіант 2, табл. 3):
a – збільшення $\times 100$; *б* – збільшення $\times 200$

Fig. 1. Microstructure of steel after the thermochemical treatment (option 2, Table 3):
a – increase $\times 100$; *b* – increase of $\times 200$

У перехідній зоні кількість залишкового аустеніту зменшувалась майже вдвічі ($\approx 15\%$). Мікроструктура серцевини становила низьковуглецевий мартенсит відпускання.

Зразки, оброблені за варіантами 1 і 2 (табл. 3), випробували на термостійкість із наступним вимірюванням гарячої твердості (табл. 4). Установлено значну перевагу твердості зразків, які оброблені на вторинну твердість.

Таблиця 4

Результати випробувань гарячої твердості сталі 09Х3НМ3ФБч

Table 4

Hot hardness test of steel 09Cr3NiMo3VNbr

№ зразка	Температура витримки, °С	Твердість HRC	
		До випробувань на термостійкість	Після випробувань
1	350	58,5–59	57
	400	59,5	57–58
	450	60	56–57
2	350	60	60
	400	61	61
	450	60,5	61

Випробування гарячої твердості показали задовільні результати зразків після термічної обробки за варіантом 2 (табл. 3), що свідчить про забезпечення стабільної структури в умовах експлуатації сталі. Наступні режими ХТО розроблені з метою зменшення кількості залишкового аустеніту й отримання однорідної структури в дифузійному та перехідному шарі.

Хіміко-термічна обробка зразків за варіантом 3 (табл. 3) сприяла незначному зменшенню кількості залишкового аустеніту. Збільшення кількості відпускань порівняно з режимом обробки викликало появу дисперсних спеціальних карбідних фаз типу MeC.

Після обробки за варіантом 4 (табл. 3) мікроструктура цементованого шару представляла собою дрібногочастий мартенсит і залишковий аустеніт (10 %) у поверхневому шарі. Таким чином, гартування за високої температури забезпечило отримання бажаної глибини цементованого шару, трикратне відпускання надало однорідності структурі, а додаткова обробка холодом зменшила кількість залишкового аустеніту в 3 рази порівняно з варіантами обробки 2 і 3.

Для визначення ефективної глибини дифузійного шару міряли мікротвердість за перетином зразка (рис. 2). У поверхневих шарах 0,2–0,4 мм найвищу твердість мали зразки, які оброблені за варіантом 4 (табл. 3). Це обумовлено мінімальною кількістю залишкового аустеніту.

Відповідно до результатів вимірювання мікротвердості за перетином зразків установили глибину азотованого шару, яка складала 0,42 мм. Мікроструктурний аналіз показав, що в приповерхневій зоні виникла частково деазотована ϵ -фаза, а також надлишкові нітриди більшого розміру загальною глибиною залягання 0,053–0,047 мм (рис. 3, а). По перетину азотованого шару утворився азотистий мартенсит і залишковий аустеніт, надлишкові нітриди майже відсутні. На глибині 0,26 мм від поверхні утворились продольні тріщини (рис. 3, б).

Детальне вивчення тонкої мікроструктури сталі виявило ліквацийні ділянки Nb, переважно орієнтовані за границями зерен. Суцільні їх виділення можуть перешкоджати дифузії вуглецю та азоту й обумовлювати підвищення напружень у міжфазних зонах, що приводить до появи тріщин.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

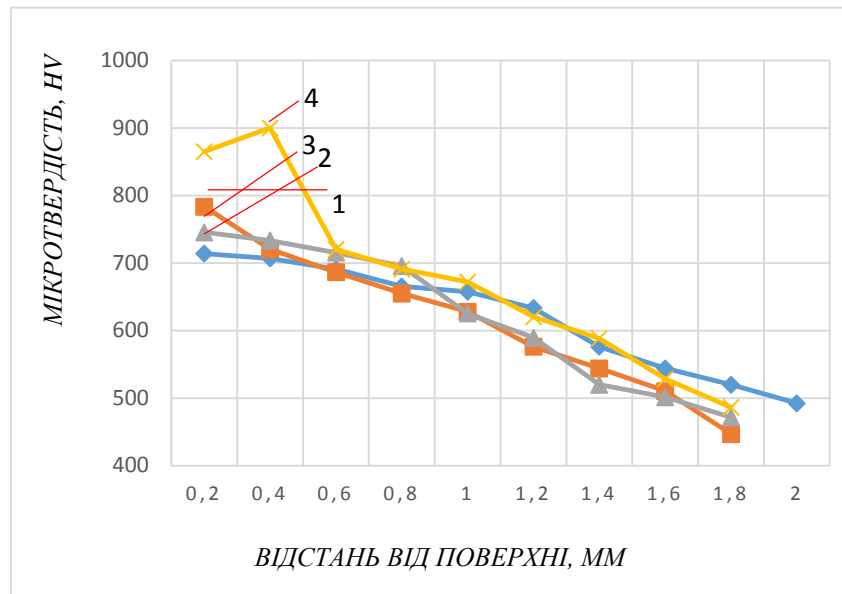
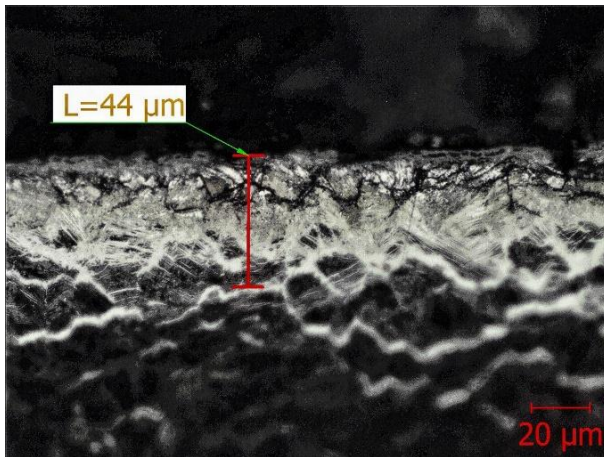


Рис. 2. Залежність мікротвердості цементованого шару сталі 09Х3НМ3ФБч від його глибини за різних варіантів ХТО (табл. 3)

Fig. 2. Dependence of microhardness distribution on depth of the carbonized layer of steel 09Cr3NiMo3VNbr under different variants of thermochemical treatment (Table 3)

a – a



б – б

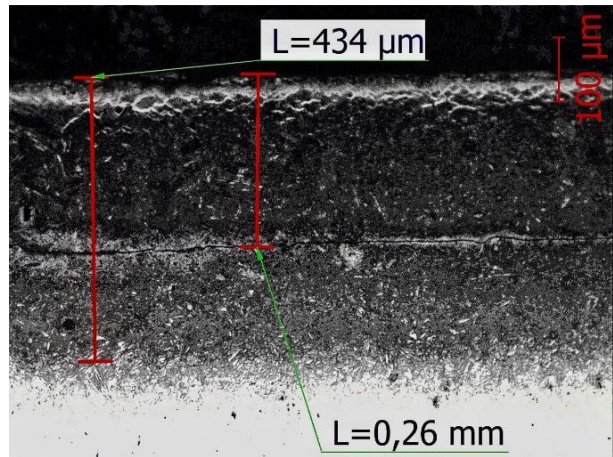


Рис. 3. Мікроструктура азотованого шару сталі 09Х3НМ3ФБч:
a – збільшення у 200; *б* – збільшення у 100 разів

Fig. 3. Microstructure of nitrated steel layer on 09Cr3NiMo3VNbr steel:
a – increase of 200; *b* – increase of 100 times

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено раціональний режим хіміко-термічної й термічної обробки для нової багатокомпонентної сталі 09Х3НМ3ФБч, який дозволяє отримати високі показники гарячої тве-

рдості 61 HRC й границі міцності 1219–1309 МПа. Ударна в'язкість забезпечується високою термостійкістю дисперсної фази, яка складається зі спеціальних карбідів молібдену, ніобію, хрому сприятливої морфології. Вибраний режим хіміко-термічної й термічної оброб-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ки забезпечує отримання однорідної структури й мінімальної кількості аустеніту (до 10 %), у результаті чого досягається висока зносостійкість робочого шару зубчастих коліс авіаційних редукторів.

Висновки

За результатами проведених досліджень встановлено оптимальний режим ХТО й ТО для сталі 09ХЗНМЗФБч промислового виробництва, який забезпечує оптимальну структуру

й високі показники експлуатаційних властивостей.

Випробування на гарячу твердість за 450 °С сталі 09ХЗНМЗФБч показали задовільні результати після термічної обробки на вторинне твердіння, водночас збільшились показники границі міцності до 1 219–1 309 МПа. Низькі показники ударної в'язкості й утворення тріщин під час азотування обумовлені зональною ліквідацією й пов'язані з порушенням технології виробництва сталі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лазечный, И. Н. Формирование при ХТО структуры и свойств цементуемых сталей различной теплоустойчивости / И. Н. Лазечный, И. П. Банас // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2005. – № 1. – С. 37–44.
2. Мартиненко, В. В. Випробування контактної витривалості цементованих сталей для зубчастих коліс та шарикопідшипників / В. В. Мартиненко, В. Г. Міщенко // Зб. наук. пр. студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука-2016»: у 4 т. / Запоріж. нац. ун-т. – Запоріжжя, 2016. – Т. 1. – С. 356–358.
3. Міщенко, В. Г. Дослідження структури та властивостей вториннотвердіючих цементованих сталей / В. Г. Міщенко, О. І. Меньяло, О. С. Багрійчук // Матеріалознавство і термічна обробка металів. – 2013. – № 2-3. – С. 48–53.
4. Мохова, А. С. Вакуумная комбинированная химико-термическая обработка стали ВКС-10 [Електронний ресурс] / А. С. Мохова, А. Е. Смирнов, А. П. Алёхин // Инженерный вестник. – 2015. – № 12. – Режим доступу: <https://engsi.ru/doc/829172.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 12.08.2019.
5. Перетворення аустеніту в цементованій сталі 13ХЗНВМ2Ф / І. М. Лазечний, О. В. Лисиця, В. Г. Міщенко, В. Л. Сніжної, Г. В. Сніжної // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 2. – С. 47–52.
6. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей : произв.-практ. издание / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, И. П. Нежурин [и др.] ; под ред. Ю.С. Елисеев. – Москва : Высшая школа, 2001. – 493 с.
7. Evolution of carbides on surface of carburized M50NiL bearing steel / J. L. Lian, L. J. Zheng, F. F. Wang, H. Zhang // Iron and Steel Research International. – 2018. – Vol. 25. – Iss. 11. – P. 1198–1211. doi: <https://doi.org/10.1007/s42243-018-0166-4>
8. Mixed-surface impregnation of gear wheels made of 13Kh3N3M2VFB-sh age-hardenable integrally alloyed steel aimed at improving surface hardness, wear-resistance, and back-to-back endurance / A. E. Smirnov, A. S. Mokhova, M. Y. Semenov, L. I. Kuksenova, R. S. Fakhurtdinov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2017. – Vol. 46. – Iss. 4. – P. 404–408. doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618817040173>
9. Ooi, S. Duplex Hardening of Steels for Aeroengine / S. Ooi, H. K. D. H. Bhadeshia // ISIJ International. – 2012. – Vol. 52. – Iss. 11. – P. 1927–1934. doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1927>
10. Parameters control of 09Cr3NiMo3VNbr carburizing steel diffusion layer in the process of thermochemical treatment / V. G. Mishchenko, O. I. Meniailo, O. S. Bagriichuk, O. I. Bulakh // Materials Science & Technology Conference and Exhibition 2016 (MS&T'16) (23–27 October 2016). – Salt Lake City, United States, 2016. – Vol. 2. – P. 159–166.
11. Ryzhov, N. M. Technological provision of contact fatigue resistance for cemented gear wheels made of heat-resistant steels / N. M. Ryzhov // Metal Science and Heat Treatment. – 2010. – Vol. 52. – Iss. 7–8. – P. 330–335. doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9277-7>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В. В. КЛОЧИХИН¹, А. Б. МИЛОСЕРДОВ², О. С. ПОДороГА^{3*}, В. Г. МИЩЕНКО^{4*}¹АО «Мотор Сич», пр. Моторостроителей, 15, Запорожье, Украина, 69068, тел. +38 (061) 720 50 53, эл. почта tb.ugmet@motorsich.com, ORCID 0000-0002-0754-5543²ГП «Ивченко–Прогресс», ул. Иванова, 2, Запорожье, Украина, 69068, тел. + 38 (061) 720 64 03, эл. почта 77@ivchenko-progress.com, ORCID 0000-0002-3914-3725^{3*}Каф. «Прикладная физика и наноматериалы», Запорожский национальный университет, ул. Жуковского, 66, Запорожье, Украина, 69600, тел. +38 (068) 262 28 94, эл. почта ospodoroha@outlook.com, ORCID 0000-0001-7543-1276^{4*}Каф. «Прикладная физика и наноматериалы», Запорожский национальный университет, ул. Жуковского, 66, Запорожье, Украина, 69600, тел. + 38 (061) 228 12 06, эл. почта mishchen4@gmail.com, ORCID 0000-0003-0992-478X**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛИ 09ХЗНМЗФБч ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

Цель. В работе необходимо исследовать формирование структурного состояния новой стали 09ХЗНМЗФБч после цементации и последующей термической обработки и азотирования. Определить рациональный режим химико-термической обработки, который будет обеспечивать создание однородного диффузионного слоя и высокие механические и эксплуатационные характеристики. **Методика.** Химико-термическую обработку проводили на первичное и вторичное твердение по четырем вариантам с использованием печей SIEMENS и ACEA. Азотирование проводили в два этапа. Для выявления микроструктуры стали опытно-промышленного производства проводили травление в 4 процентном растворе азотистой кислоты, металлографические исследования проводили по сечению образцов на микроскопе Axio Observed.D1m. Для определения эффективной глубины диффузионных слоев после цементации и азотирования измеряли микротвердость на приборе LECO LM248AT, а измерения горячей твердости проводили на приборе Wilson Rockwell Hardness Tester. **Результаты.** Для получения однородного структурного состояния стали 09ХЗНМЗФБч и максимальных результатов механических и эксплуатационных характеристик проводили химико-термическую обработку по режиму: цементация при 930 °С с углеродным потенциалом 0,22, 13 ч отжиг при 650 °С, 5–7 ч закалка от 1 030 °С с охлаждением в масле, трехкратный отпуск при 530 °С, обработка холодом – 70 °С с выдержкой 1 ч 30 мин и последующий отпуск при 510 °С 1 ч. После цементации закалку проводили в интервале температур 1 000–1 030 °С для предотвращения перенасыщения рабочего диффузионного слоя и образования карбидной сетки. Последующий трехкратный отпуск при 530 °С и обработка холодом – 70 °С в течение 1 ч 30 мин способствовали распаду остаточного аустенита и образованию более мелкозернистого мартенсита отпуска. **Научная новизна.** Разработано рациональный режим химико-термической обработки, который обеспечивает максимальные механические и эксплуатационные свойства стали 09ХЗНМЗФБч благодаря заранее определенному соотношению структурных составляющих цементированного слоя. **Практическая значимость.** Апробированный режим химико-термической обработки многокомпонентной легированной стали 09ХЗНМЗФБч производства АО «Мотор Сич» и ГП «Ивченко–Прогресс», которая разработана для зубчатых колес авиационных редукторов газотурбинных двигателей нового поколения значительно увеличивает тепло- и энергонагрузку.

Ключевые слова: микроструктура; мартенсит; аустенит; цементация; азотирование; микротвердость; твердость; предел прочности

V. V. KLOCHIKHIN¹, O. B. MILOSERDOV², O. S. PODOROHA^{3*}, V. H. MISHCHENKO^{4*}¹Motor Sich JSC, Motorobudivnykiv Av., 15, Zaporizhzhia, Ukraine, 69068, tel. +38 (061) 720 50 53, e-mail tb.ugmet@motorsich.com, ORCID 0000-0002-0754-5543²SE «Ivchenko–Progress», Ivanova St., 2, Zaporizhzhia, Ukraine, 69068, tel. + 38 (061) 720 64 03, e-mail 77@ivchenko-progress.com, ORCID 0000-0002-3914-3725^{3*}Dep. «Applied Physics and Nanomaterials», Zaporizhzhia National University, Zhukovskoho St., 66, Zaporizhzhia, Ukraine, 69600, tel. +38 (068) 262 28 94, e-mail ospodoroha@outlook.com, ORCID 0000-0001-7543-1276^{4*}Dep. «Applied Physics and Nanomaterials», Zaporizhzhia National University, Zhukovskoho St., 66, Zaporizhzhia, Ukraine, 69600, tel. + 38 (061) 228 12 06, e-mail mishchen4@gmail.com, ORCID 0000-0003-0992-478X

FEATURES OF FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF STEEL 09Cr3NiMo3VNbr DURING THERMOCHEMICAL TREATMENT

Purpose. The article is aimed to investigate the structural state formation of the new 09Cr3NiMo3VNbr steel after cementation and nitration with subsequent heat treatment. To determine the rational mode of thermochemical treatment, which will ensure the creation of a uniform diffusion layer and high mechanical and operational characteristics. **Methodology.** Thermochemical treatment was carried out on primary and secondary hardening in four versions using the SIEMENS and ACEA furnaces. Nitration was carried out in two stages. To identify the microstructure of pilot production steel the nitric acid etching in a 4% solution of nitrous acid was carried out, the metallographic studies were performed on the cross section of the samples on Axio Observed.D1m microscope. To determine the effective depth of the diffusion layers after cementation and nitration, microhardness was measured on LECO LM248AT instrument, and hot hardness measurements were performed on Wilson Rockwell Hardness Tester instrument. **Findings.** To obtain a homogeneous structural state of steel 09Cr3NiMo3VNbr and maximize the results of mechanical and performance characteristics, thermochemical treatment was performed according to the following mode: cementation at 930°C with a carbon potential of 0.22, 13 hours, annealing 650°C, 5-7 hours, hardening from 1 030°C with cooling in oil, three-time tempering 530°C, cold treatment – 70°C with a holding time of 1 h. 30 min. and subsequent tempering at 510°C, 1 hour. After cementation, hardening was carried out in the temperature range of 1000–1030°C to prevent oversaturation of the working diffusion layer and formation of a carbide mesh. Subsequent three-time tempering at 530°C and cold treatment of – 70°C for 1 h. 30 min. contribute to the decomposition of residual austenite and the formation of fine-grained tempering martensite. **Originality.** We developed the optimal mode of thermochemical treatment, which will ensure maximum mechanical and operational properties of steel 09Cr3NiMo3VNbr due to a predetermined ratio of the structural components of the cemented layer. **Practical value.** The tested mode of thermochemical treatment of multicomponent alloyed 09Cr3NiMo3VNbr steel, produced by Motor Sich JSC and Ivchenko–Progress, which was developed for the gears of aviation gearboxes of gas turbine engines of the new generation, significantly increases heat and power load.

Keywords: microstructure; martensite; austenite; cementation; nitration; microhardness; hardness; tensile strength

REFERENCES

1. Lazechnyy, I. N., & Banas, I. P. (2005). Formirovanie pri KhTO struktury i svoystv tsementuemykh staley razlichnoy teplostoykosti. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 1, 37-44. (in Russian)
2. Martynenko, V. V., & Mishchenko, V. H. (2016). Vyprobuvannya kontaktnoi vytryvalosti tsementovanykh staley dlia zubchastykh kolis ta sharykopydshyynykiv. *Moloda nauka-2016* (Vol. 1-4). Zaporizhzhia, 356-358. (in Ukrainian)
3. Mishchenko, V. H., Meniailo, O. I., & Bahriichuk, O. S. (2013). Doslidzhennia struktury ta vlastyvostei vtorynnotverdiuchykh tsementovanykh staley. *Materialoznavstvo i termichna obrobka metaliv*, 2-3, 48-53. (in Ukrainian)
4. Mokhova, A. S., Smirnov, A. Ye., & Alekhin, A. P. (2015). Vakuumnaya kombinirovannaya khimiko-termicheskaya obrabotka stali VKS-10. *Inzhenernyy vestnik*, 12. Retrieved from <https://engsi.ru/doc/829172.html> (in Russian)
5. Lazechnyi, I. M., Lysytsia, O. V., Mishchenko, V. H., Snizhnoi, V. L., & Snizhnoi, H. V. (2011). Peretvorennya austenitu v tsementovanii stali 13Kh3NVM2F. *Novi materiali i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 2, 47-52. (in Ukrainian)
6. Yeliseev, Y. S., Krymov, V. V., & Nezhurin, I. P. (2001). *Proizvodstvo zubchatykh koles gazoturbinykh dvigateley*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
7. Lian, J. L., Zheng, L. J., Wang, F. F., & Zhang, H. (2018). Evolution of carbides on surface of carburized M50NiL bearing steel. *Iron and Steel Research International*, 25(11), 1198-1211. doi: <https://doi.org/10.1007/s42243-018-0166-4> (in English)
8. Smirnov, A. E., Mokhova, A. S., Semenov, M. Y., Kuksenova, L. I., & Fakhurtdinov, R. S. (2017) Mixed-surface impregnation of gear wheels made of 13Kh3N3M2VFB-sh age-hardenable integrally alloyed steel

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- aimed at improving surface hardness, wear-resistance, and back-to-back endurance. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 46(4), 404-408. doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618817040173> (in English)
9. Ooi, S., Bhadeshia, H. K. D., (2012). Duplex Hardening of Steels for Aeroengine. *ISIJ International*, 52(11), 1927-1934. doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1927> (in English)
 10. Mishchenko, V. G., Meniailo, O. I., Bagriichuk, O. S., & Bulakh O. I. (2016). *Parameters control of 09Cr3NiMo3VNbr carburizing steel diffusion layer in the process of thermochemical treatment, Materials Science & Technology Conference and Exhibition 2016, MS&T'16*. Salt Lake City, United States, 2, 159-166. (in English)
 11. Ryzhov, N. M. (2010). Technological provision of contact fatigue resistance for cemented gear wheels made of heat-resistant steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 52(7), 330-335. doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9277-7> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.02.2019

Прийнята до друку: 25.07.2019

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

UDC 629.463.62.027.4:625.143.3.033.373

O. V. SHATUNOV^{1*}, A. O. SHVETS^{2*}, O. A. KIRILCHUK^{3*}, A. O. SHVETS^{4*}

^{1*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 953 60 14, e-mail shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

^{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 (050) 214 14 19, e-mail angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

^{3*}Dep. «Car and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 776 82 27, e-mail o.a.kirilchuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0565-1692

^{4*}Dep. «Car and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (095) 235 19 67, e-mail angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-0717-2521

RESEARCH OF WHEEL-RAIL WEAR DUE TO NON-SYMMETRICAL LOADING OF A FLAT CAR

Purpose. The paper is aimed at determining the influence of non-symmetrical loading of a flat car on the magnitude of the wear factor of a **wheel-rail** pair when changing the operation parameters that occur in operation. **Methodology.** The dynamic loading of the flat car, model 13-401 with typical **three-piece bogies** is studied using a model of spatial oscillations of a **five-car** coupling with the help of mathematical and computer simulation. Theoretical calculations are performed for the most dangerous sections of the railway **track – small and** medium radius curves in the range of permissible speeds. **Findings.** The indicators of wear of the rolling stock wheels and the rails are analysed on the example of flat cars in the presence of a longitudinal and transverse displacement of the load mass centre relative to the car symmetry centre. To obtain information on the effect of permissible deviations of the arrangement of cargo in the car on the magnitude of the dynamic loading of the **wheel-rail** contact, the authors performed theoretical studies of the spatial variations of the rail carriage and its interaction with the track. **Originality.** To determine the wear of the **wheel-rail** pair, the effect of displacement in two directions from the central axis of symmetry of the load gravity centre was studied, taking into account the value of the travel speed along the curved sections of the small and medium radius using a mathematical model of coupling of five freight cars. **Practical value.** As a result of the theoretical studies carried out, the authors assessed such factors as wear factor, directional force, and hunting of the wheel set of freight rolling stock in the event of load gravity centre displacement when moving along curved sections of the railway track. To establish the possible cause of intensive wear of the wheels and rails, the following parameters were analysed: lozenging of front bogie side frames; hunting of the left side frame of the front bogie; mutual longitudinal movement of the side frame and axle box of the front wheel set; mutual hunting of the left side frame of the bogie relative to the front wheel set.

Keywords: load; flat car; lozenging of bogie side frames; load gravity centre displacement; angle of wheel set hunting; travel speed; wear factor

Introduction

The intensity of the **wheel-rail** wear is so far one of the most serious problems of rail transport. The analysis of publications and studies related to

this issue has shown that increased wear of rails and rolling stock can be caused by several reasons associated with both the state of the carriage chassis and the state of the rail track in curved sections [5, 8, 9, 16].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Wear of wheels and rails depends on physical and mechanical processes occurring in the area of their contact. The nature of these processes and their intensity depend to a large extent on external influences on the surface of the contact point, in particular, on the interaction forces of the contacting bodies and their relative displacements. Therefore, one of the possible ways to solve the problem of reducing the intensity of wear of the wheel flanges and rail head side surfaces is to establish conditions for reducing external impacts on the contacting bodies, or reducing the dynamic loading of the contact point. Of particular importance are the reciprocal movements of the contacting bodies, as the wear is associated with the work of friction (pseudo-slipping forces) in the contact area. Therefore, the solution to this problem is to minimize the forces of interaction and mutual displacement of the wheel-rail pair in the points of contact.

Determination of the wear index is connected with the task of studying spatial oscillations and the interaction of rail carriage and track. For solving this problem the Dnpro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan developed the mathematical models that make it possible to determine the necessary values of forces and displacements, and to obtain the wear indicator as the resultant value [2-4, 12, 15]. With these models, it is possible to obtain solutions for various types of wheel-rail contact, to take into

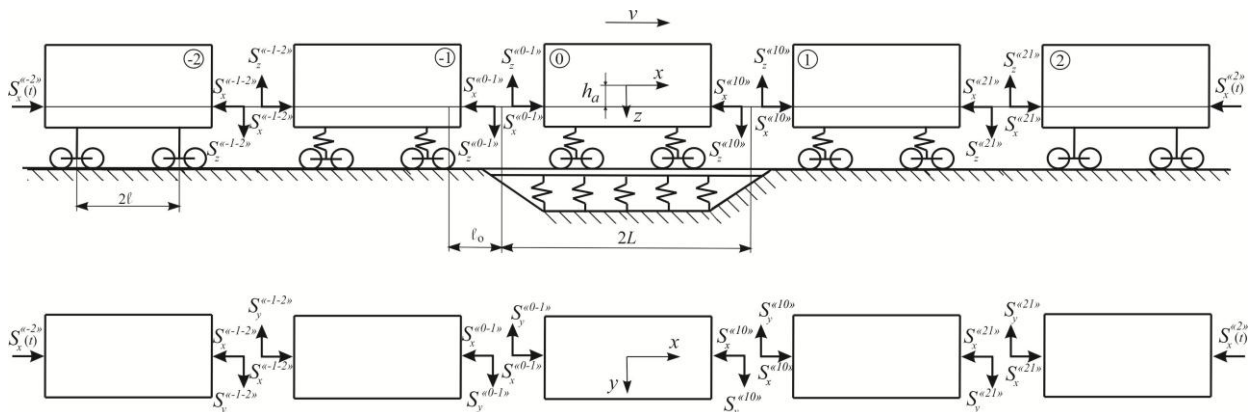
account the rigidity of the structural elements and the various deviations from the initial configuration of the system, such as the misalignment of the wheel set axles in the bogie, the difference in the wheel radii of one wheel set, of different wheel sets in a bogie and different bogies, rail gradient and wheel profile of various types, change in the cross gap of the wheel set and rail track, the change of longitudinal and cross clearance between the axle-boxes and side frames, the displacement of the body mass center relative to the car symmetry, etc. [5, 13, 17-19, 20-22].

Purpose

The purpose of this study is to determine the influence of non-symmetrical loading of a flat car on the magnitude of the wear factor of a wheel-rail pair when changing the operation parameters.

Methodology

Theoretical studies of the dynamic loading of the wheel-rail contact during the movement of 13-401 model flat car with typical bogies 18-100 in the speed range 50 ÷ 90 km/h in the small and middle radius curves were performed using the model of spatial oscillations of a five-car coupling (Fig. 1) [2-4, 6, 10, 21].



РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

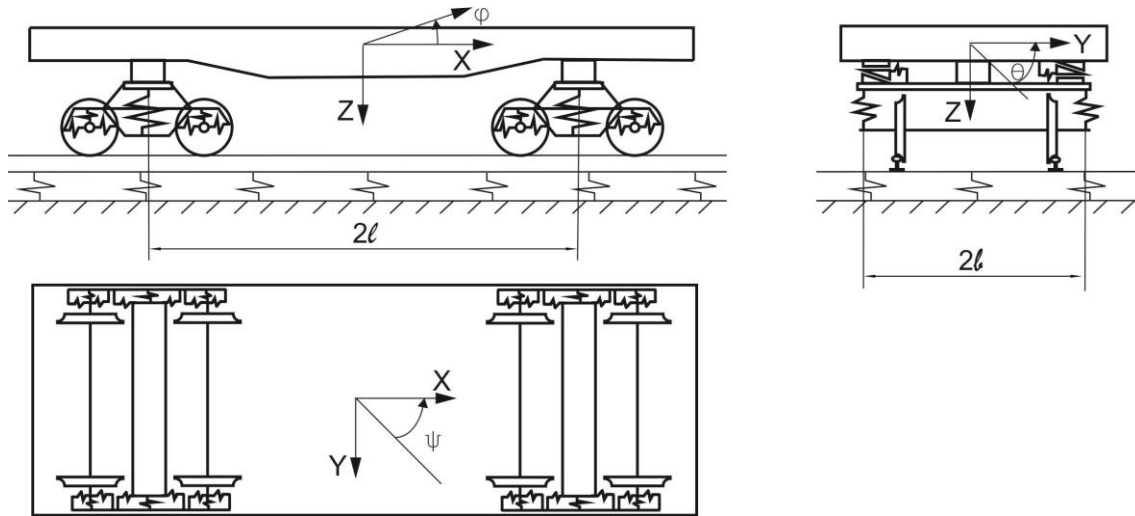


Fig. 2. Design diagram of the 4-axle flat car

In our research we studied the effect of the load mass center shift on the flat car frame in the longitudinal A_x and transverse directions A_y , as well as in both directions simultaneously. Preliminary theoretical studies have shown that in the presence of a transverse or simultaneous transverse and longitudinal displacement of the load mass center over $A_y = 0.15$ m there is a sharp decrease in the derailment coefficient and a high probability of rolling stock derailment [21].

In order to determine the effect of only the load mass centre displacement on the factor of wheel and rail wear, the displacement in the transverse and simultaneous transverse and longitudinal directions is considered within the limits $A_y \rightarrow -0.15 \div 0.15$ m and $A_x \rightarrow 0; 0.15$ m. The stationary movement of a five-freight-car coupling in the right curve is studied. Consequently, the left wheel of the first wheel set climbs the outer rail. The carriage chassis, the wheel rolling surface and the rail head profile are provided in a normal technical condition.

Findings

The graphs of variance of the studied parameters during the movement in the curve sections of the track $R = 600$ and 350 m are shown in Fig. 3-8. The displacement in the longitudinal direction (Fig. 3, 4) is considered in the range from 0

to $A_x = 0.3$ m. For a detailed analysis of the physical processes occurring during the sliding of the wheel flange on the rail side face, it is necessary to investigate the corresponding dependences of the directional force and the striking angle of the wheel set [5].

As can be seen from Fig. 3 (a, b), increase of the longitudinal displacement of the load mass center has almost no effect on the wear factor. This indicator is significantly influenced by the travel speed. In curves $R = 350$ m, the wear factor F with an increase in speed from 50 to 70 km/h decreases by 2.7 times. The wear factor in the curves of the small radius is greater than the corresponding values in the curves of the average radius by $16.8 \div 6.7$ times in the speed range $50 \div 70$ km/h. This can be explained by the higher levels of the directional forces Y_N (Fig. 3, c, d) and the hunting angles ψ_{ws} (Fig. 3, e, f) in the curves $R = 350$ m. At a speed of 90 km/h, the index ψ_{ws} in case of increasing the longitudinal displacement in the curve $R = 600$ m from 0 up to 0.3 m is significantly differs from the speed interval $50 \div 80$ km/h and exceeds the corresponding values by an average of 29.5%. In addition, the hunting angles ψ_{ws} in both curves have a sign «-», that is, the wheel sets rotate in the track plane against the direction of the curve in accordance with the accepted rule of the signs (Fig. 2).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

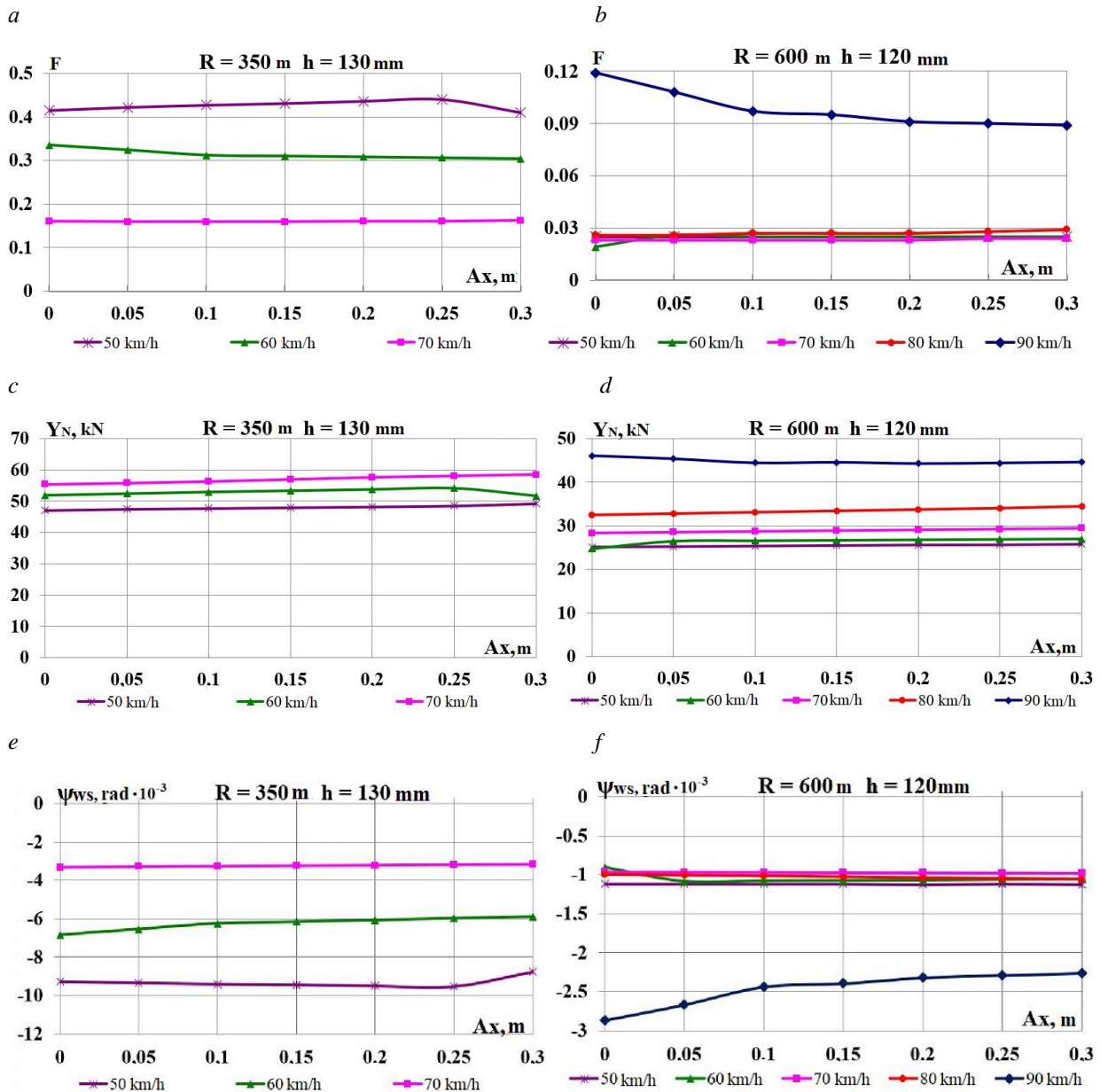


Fig. 3. Graphs of dependence on load displacement in the longitudinal direction:

a, b – wear factor; *c, d* – directional force acting from the rail side on the wheel;
e, f – hunting of the wheel set

The disadvantages of the three-piece bogie of 18-100 model include the possibility of side frames lozenging under the action of the longitudinal components of the frictional forces on the wheel-rail contacts, which causes loss of the bogie frame geometry and the appearance of distortions of the wheel set axle therein. In addition, the design of

the side frame box opening and the axle box presupposes the presence of longitudinal and transverse gaps between the box housing lug and the box opening guides, through which the nature of their contact can also change. This phenomenon negatively affects the dynamics of the car and, as

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

a result, leads to intensive wear of the wheel flanges [1, 7, 9, 14, 23].

In addition, the mutual longitudinal lozenging of side frames are particularly harmful when moving along curved track sections, as they cause the turns of the wheel sets in the track plane against the direction of the curve. This, in turn, increases the striking angles of the wheel flanges on the rails, resulting in their mutual wear, since this reduces the contact area of the flange with the rail side face

and, accordingly, increases the specific pressure on it, which determines their wear.

To determine the probable cause of the intense wear of the wheels and rails during the movement in the curves $R = 600$ m, let us consider the following parameters: lozenging of side frames of the front bogie; hunting of the left side frame of the front bogie; mutual longitudinal displacement of side frame and axle box of the front wheel set; mutual hunting of the bogie left side frame relative to the front wheel set (Fig.4).

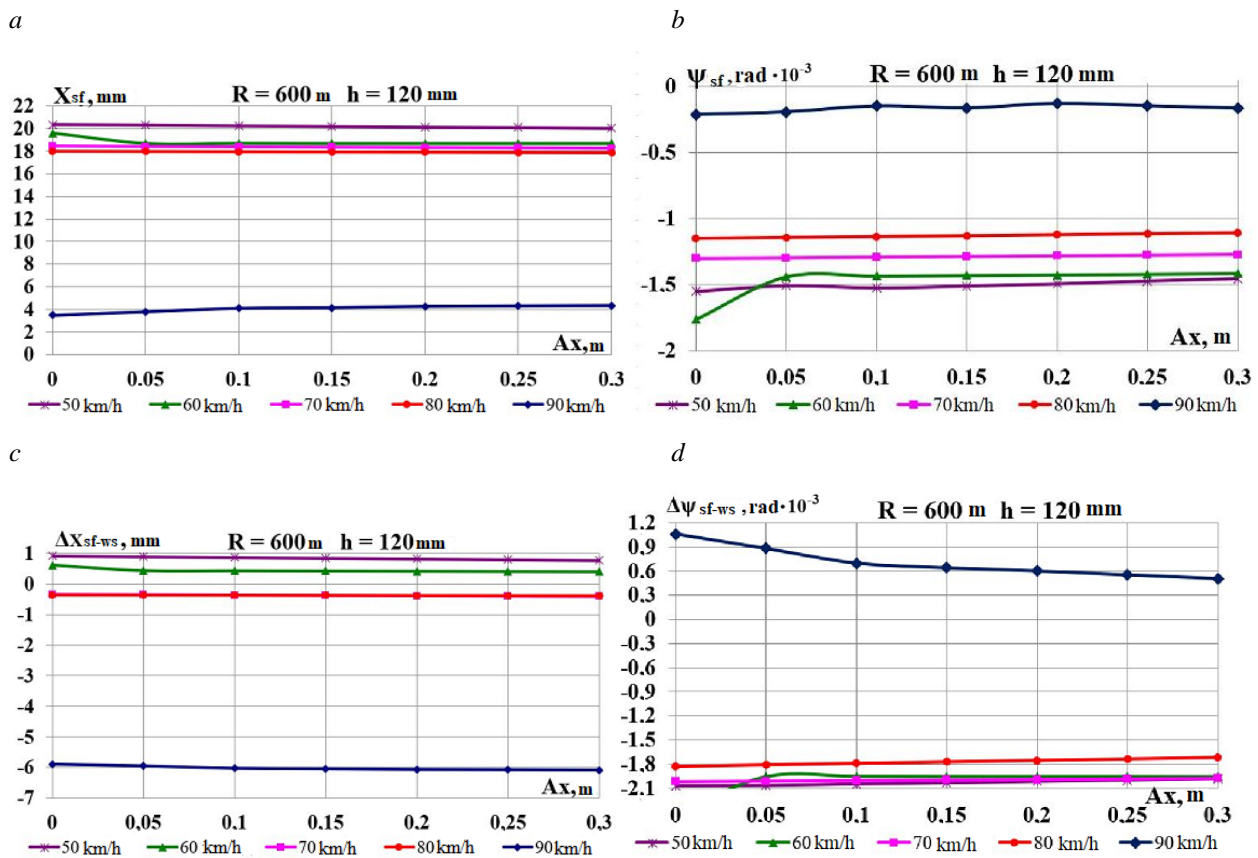


Fig. 4. Graphs of dependence on load displacement in the longitudinal direction:
a – lozenging of side frames of the front bogie;
b – hunting of the left side frame of the front bogie;
c – mutual longitudinal displacement of side frame and axle box of the front wheel set;
d – mutual hunting of the bogie left side frame relative to the front wheel set

The results of theoretical studies in Fig. 4 show that the lozenging of the side frames of the front bogie X_{sf} (Fig. 4, *a*) and the hunting of the left side frame of the front bogie ψ_{sf} (Fig. 4, *b*) at a speed of 90 km/h are 5 times less than in the range of 50 ÷ 80 km/h. The hunting angles ψ_{sf} also have the sign «–», that is, the left side frame of the

front bogie rotates in the track plane against the direction of the curve. Significant increase in the wheel set hunting angles ψ_{ws} occurs due to significant mutual longitudinal displacements of the side frame and the axle box of the front wheel set ΔX_{sf-ws} (Fig. 4, *c*), as well as the hunting of the left side frame of the bogie relative to the front wheel

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

set through the shift of the boxes in the side frame openings $\Delta\psi_{sf-ws}$ (Fig. 4, *d*). There is almost no dependence of the values of the indicators Δx_{sf-ws}

and $\Delta\psi_{sf-ws}$ on the load shift in the longitudinal direction.

Transverse displacement of the load is considered in the range from $A_y = -0.15$ to 0.15 m (Fig. 5, 6) [11].

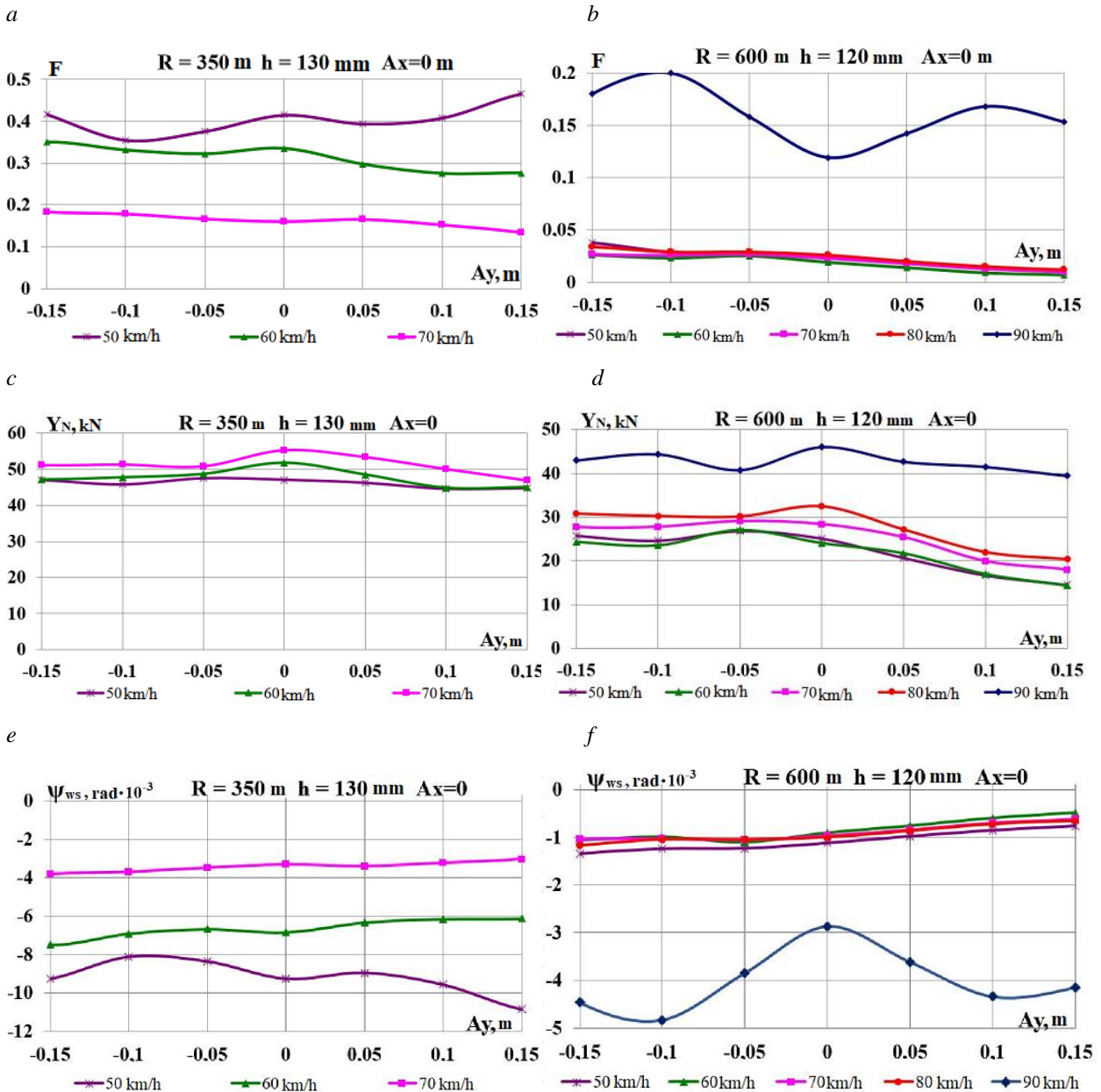


Fig. 5. Graphs of dependence on load displacement in the transverse direction: *a, b* – wear factor; *c, d* – directional force acting from the rail side on the wheel; *e, f* – hunting of the wheel set

Fig. 5 shows the effect on the studied parameters of the transverse displacement of the load mass center A_y in the curves $R = 350$ m and

$R = 600$ m, respectively. With increased A_y the wear factor F (Fig. 5, *a*) in the curve $R = 350$ m does not change so linearly, as in case of longitu-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

dinal displacement, but also decreases in case of speed rise. In the curve $R=600$ m F decreases due to the load relief of the climbing wheel. Exception from the general picture, as in the previous case, is the speed of 90 km/h. The wear factor curve F (Fig. 5, *b*) has extremes for $A_y = 0.1$ m in both directions from the axis of symmetry of the flat car frame. In case of transverse displacement of the load mass center, there are higher directed

forces Y_N (Fig. 5, *c, d*) and hunting angles ψ_{ws} (Fig. 5, *e, f*) in the curves $R=350$ m. The wheel set hunting ψ_{ws} at the speed of 90 km/h in the curve $R=600$ m is also significantly different from the speed range 50 ÷ 80 km/h and is directed in the track plane against the direction in both curves.

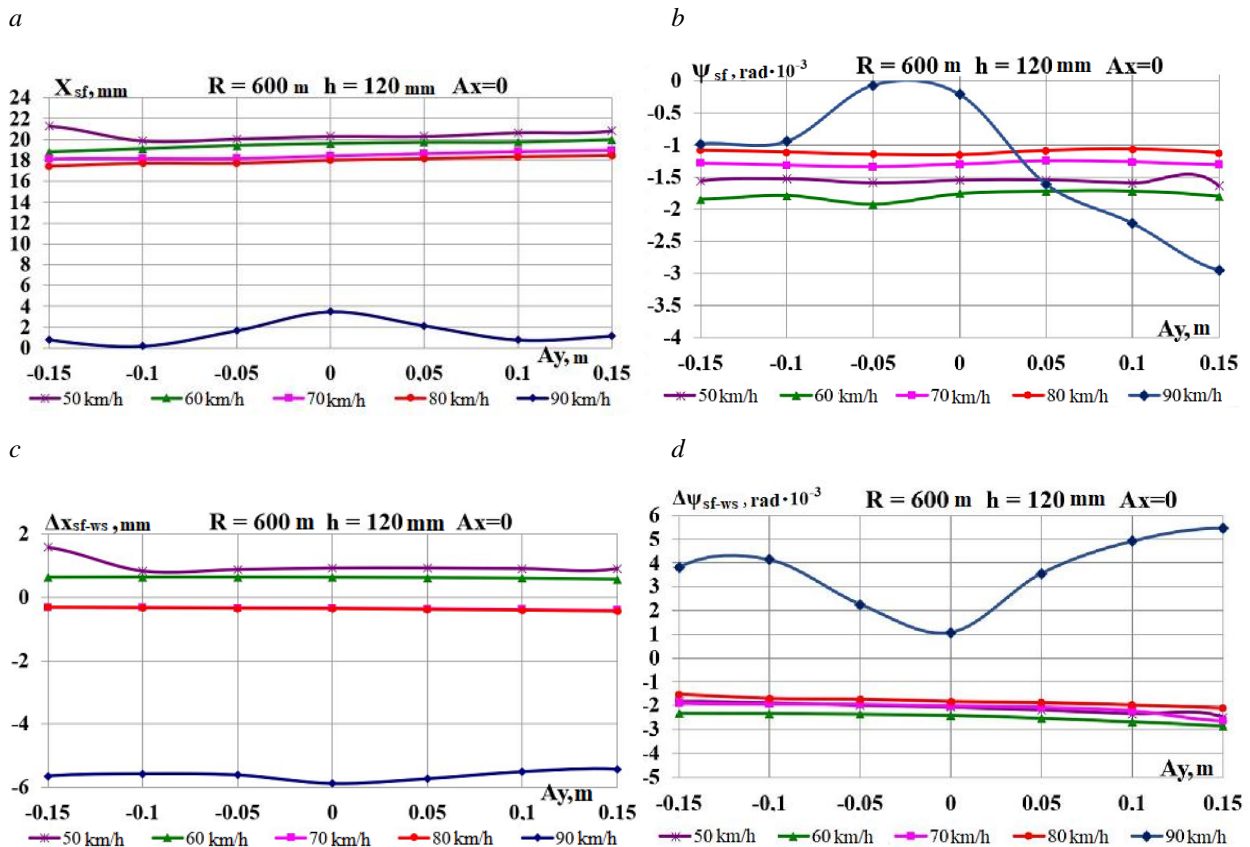


Fig. 6. Graphs of dependence on load displacement in the transverse direction:
a – lozenging of side frames of the front bogie;
b – hunting of the left side frame of the front bogie;
c – mutual longitudinal displacement of side frame and axle box of the front wheel set;
d – mutual hunting of the bogie left side frame relative to the front wheel set

Graphic dependencies in Fig. 6 show that the front bogie side frame hunting X_{sf} (Fig. 6, *a*) at speed of 90 km/h are 7 times smaller than in the range of 50 ÷ 80 km/h and 2 times smaller than at equivalent value for longitudinal displacement. Comparing Fig. 4, *b* and Fig. 6, *b*, we should note that the presence of a transverse displacement of the load mass center on the flat car leads to significant changes in the nature of the hunting of the left

side frame of the front bogie ψ_{sf} at a speed of 90 km/h. The hunting angles ψ_{sf} (Fig. 6, *b*) also have the « \leftrightarrow » sign. As for longitudinal displacement, a significant increase in the wheel set hunting angles ψ_{ws} occurs due to significant mutual longitudinal displacements of the side frame and the axle box of the front wheel set Δx_{sf-ws} (Fig. 6, *c*), as well as the hunting of the left side frame of

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

the bogie relative to the front wheel set through the shift of the boxes in the side frame openings $\Delta\psi_{sf-ws}$ (Fig. 6, d). With the exception of the speed of 90 km/h, the values of the indicators Δx_{sf-ws} and $\Delta\psi_{sf-ws}$ due to the load shift in the

transverse direction decrease in case of additional loading of the non-climbing wheel.

The simultaneous displacement of the mass center along the axes X, Y is considered for A_y in the range from -0.15 to 0.15 m and $A_x = 0.15$ m (Fig. 7) [11].

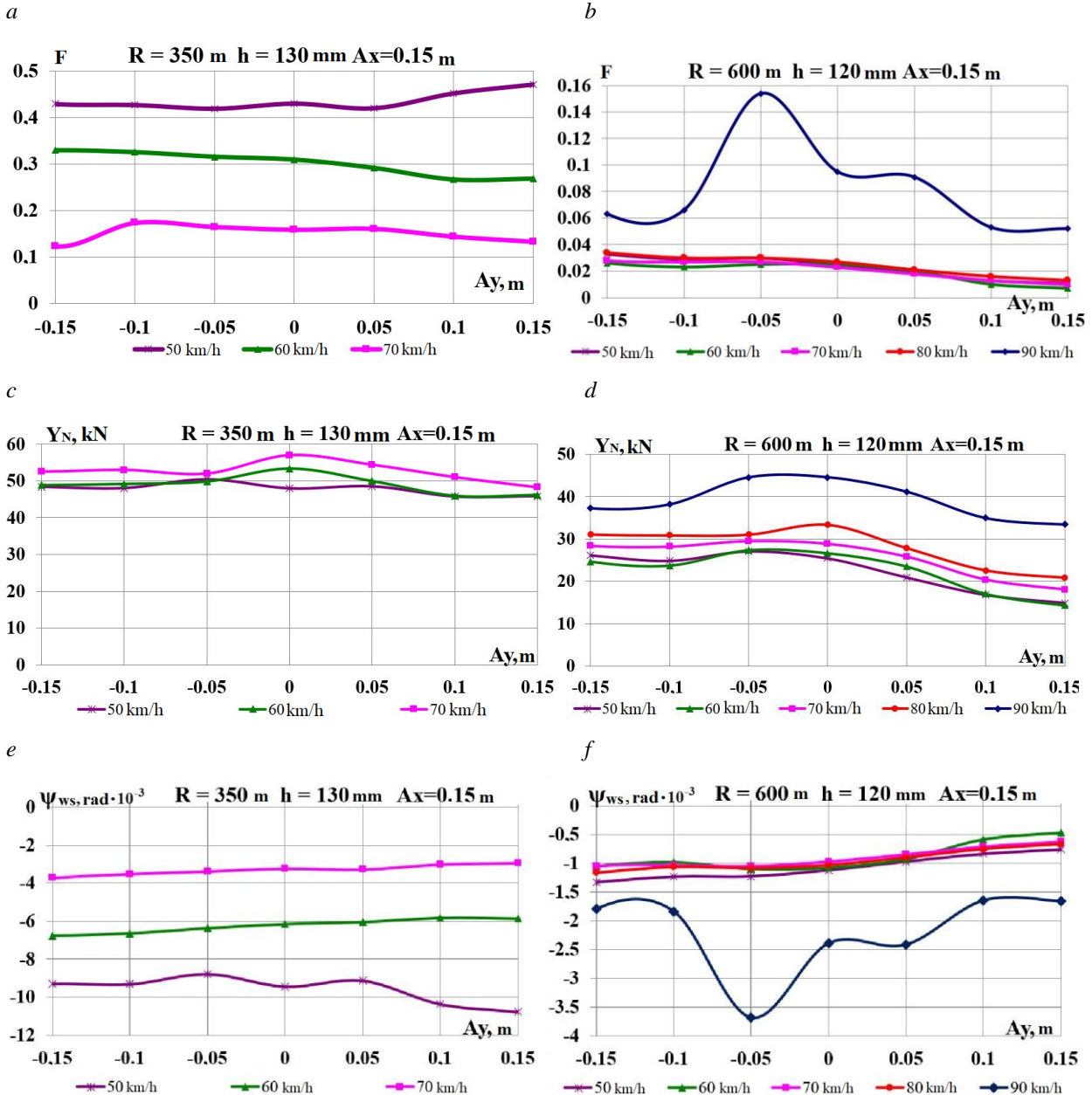
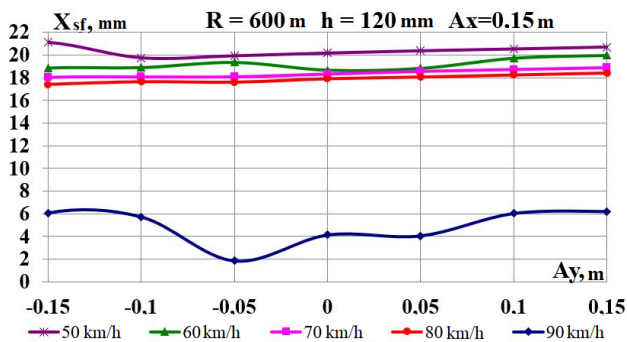


Fig 7. Graphs of dependence on simultaneous load displacement in the longitudinal and transverse direction: *a, b* – wear factor; *c, d* – directional force acting from the rail side on the wheel; *e, f* – hunting of the wheel set

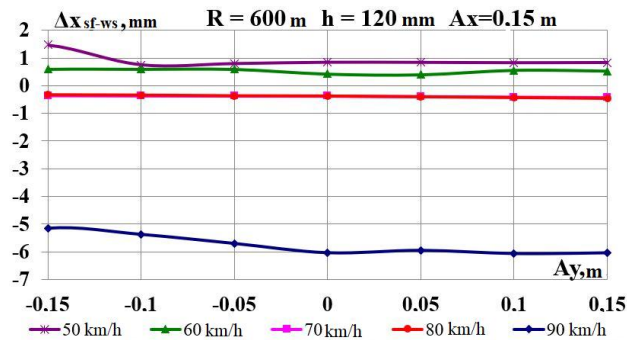
РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Fig. 7 shows the graphs of dependence of the studied parameters on the magnitude of the load mass centre displacement in the transverse direction A_y , for the longitudinal displacement $A_x = 0.15$ m. As can be seen from the comparison of the graphs given in Fig. 5 for $A_x = 0$ and Fig. 7 for $A_x = 0.15$ m, there are significant differences in the indicators F and ψ_{ws} in the curve $R = 600$ m at the speed of 90 km/h. The hunting angles ψ_{ws} in both curves have a « \rightarrow » sign and are directed

a



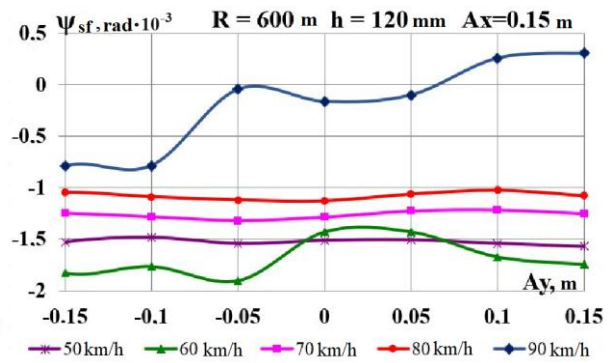
c



against the direction of the curve. Other studied indicators remain almost the same both for the transverse, and for simultaneous transverse and longitudinal displacement of the load mass centre.

Analysing the dependences on Fig. 8 it is possible to conclude that the presence of simultaneous longitudinal and transverse displacement of the mass centre significantly affects the lozengeing nature of the front bogie side frames X_{sf} (Fig. 8, a) and the hunting of the left side frame of the front bogie ψ_{sf} (Fig. 8, b) at the speed of 90 km/h.

b



d

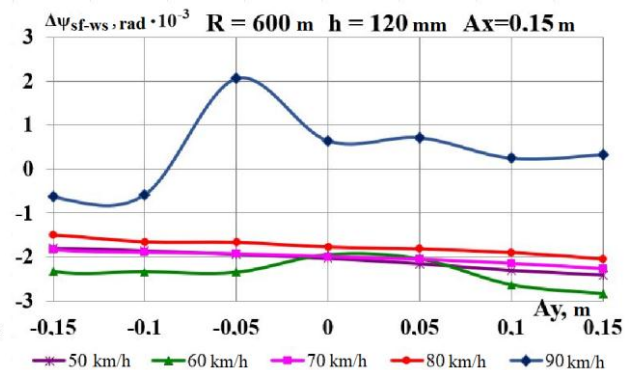


Fig. 8. Graphs of dependence on load displacement in the longitudinal and transverse direction:

a – lozengeing of side frames of the front bogie;

b – hunting of the left side frame of the front bogie;

c – mutual longitudinal displacement of side frame and axle box of the front wheel set;

d – mutual hunting of the bogie left side frame relative to the front wheel set

In case of simultaneous longitudinal and transverse displacement, a significant increase in the wheel set hunting angles ψ_{ws} also occurs due to significant longitudinal mutual displacements of the side frame and the axle box of the front wheel set ΔX_{sf-ws} (Fig. 8, c) and the hunting of the bogie

left side frame relative to the front wheel set through the shift of the boxes in the side frame openings $\Delta \psi_{sf-ws}$ (Fig. 8, d). Unlike indicators ΔX_{sf-ws} , that are almost unchanged at simultaneous longitudinal and transverse displacement, the values of the indicators $\Delta \psi_{sf-ws}$ are much lower.

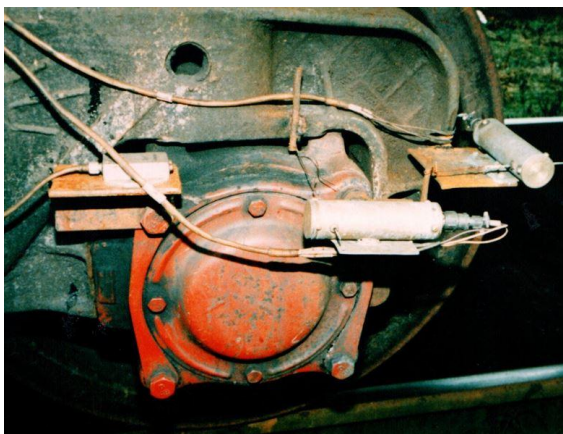
РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The Rolling Stock Dynamic and Strength Research Laboratory of DNURT conducted dynamic (running) tests of the experimental train in order to determine the dynamic load of the wheel-rail contact and the indicators characterizing the wear of the wheel set flanges and the rail side faces, for the most likely operational deviations from nominal ones in the dimensions of the carriage elements in the range of speeds 30-70 km/h. There were tested the freight flat cars of model 12-532 on three-piece bogie of model 18-100, having different state of carriage chassis, which to some extent could affect the wear of wheels and rails. For conducting the tests, there was formed an experimental train consisting of a car-laboratory, testes flat cars and ChS-2 electric locomotive. To obtain reliable information on the effect of variations in the dimensions of the chassis elements on the magnitude of the dynamic loading of the wheel-rail contact, all stages of the tests were performed on one section of the joint track [8].

We tested three loaded gondola cars with the following features in the carriage chassis dimensions:

1) Gondola No. 1, which had 6 mm difference of sideframe bases of one of the bogies (2 184.5 and 2 190.5 mm);

a – a



2) Gondola No. 2, which had 3 mm deviation in the wheel diameters of one wheel set (926 and 923 mm);

3) Gondola No. 3, which had the minimum deviations in the dimensions of the carriage chassis elements from the nominal and was taken as a standard car.

During the dynamic testing on the experimental gondola, the following values were recorded: frame forces for wheel sets; dynamic increments of the vertical forces acting on the wheel set boxes; longitudinal and horizontal transverse displacement of the boxes relative to the bogie side frames; horizontal transverse acceleration of boxes; bolster hunting angles relative to the body; the value of lozengeing of bogie side frames. During the tests, we used the sensors of displacement and bogie side frame lozengeing.

Fig. 9, *a* shows the general view of one of the axlebox mounts of the tested cars equipped with an acceleration sensor and two small displacement sensors, and Fig. 9, *b* shows the tested bogie of the 3rd standard car, with installed «in-line» camcorders, a curve entry sensor, attached to the box cover, small and large displacement sensors and an acceleration sensor.

б – б



Fig. 9. Equipment of tested cars with measuring equipment:
a – axlebox mount of the tested car with an acceleration and small displacement sensors;
b – look of the tested standard car bogie;

Fig. 10 shows the printouts of the recorded changes of the longitudinal displacements of the first wheel set axlebox mount relative to the side frames and lozengeing of the first bogie side frames

of the first and third cars during the movement of the tested train at a speed of 70 km/h. The output value of the total longitudinal clearance of the box in the box opening was 16 mm. The scale time

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

(horizontally) is selected so that the graphs display the records for the entire tested section. At the printing time of 100 seconds, the graphics correspond to approximately two kilometres, run by the experimental train along the section, including

a straight line, a curve with 600 m radius, a short line between curves, a curve with 290 m radius and a straight line. From these records it is clear that entering into the curve with 290 m radius has a striking character.

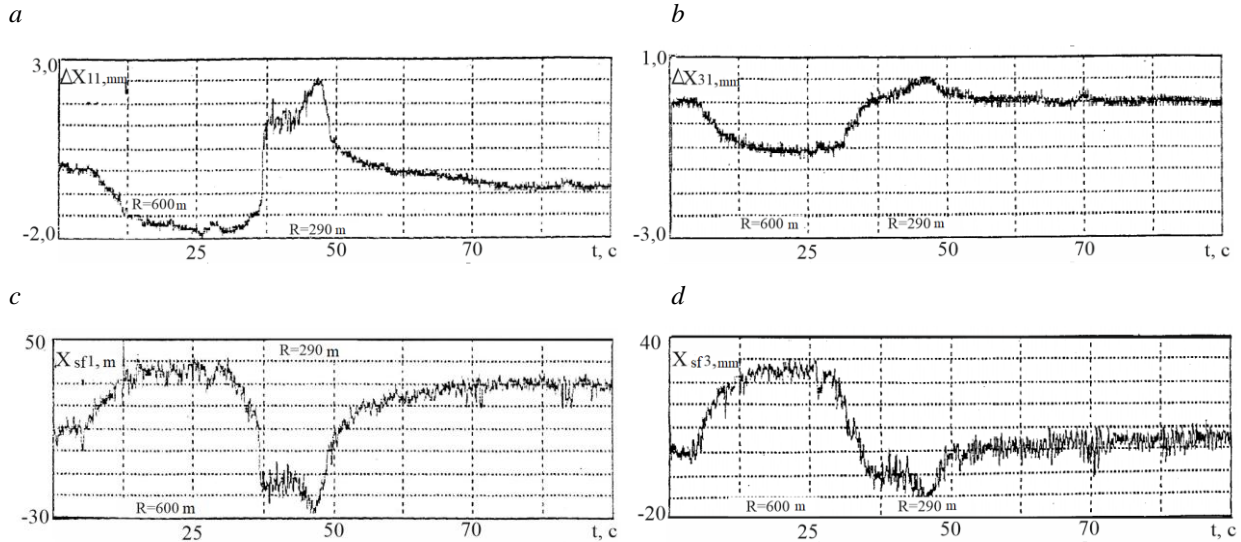


Fig. 10. Variances records:

- a, b* – longitudinal displacements of axle boxes of the first wheel set relative to the first bogie side frame of the first and third cars respectively;
c, d – lozenging of the first bogie side frames of the first and third cars respectively

The longitudinal displacement of the axle boxes relative to the side frames (Fig. 10, *a, c*) is relatively small, their double amplitude does not exceed 5 mm. Moving during the lozenging of the side frames (Fig. 10, *b, d*) have rather large values, their amplitude reaches 40 mm. The recordings of displacements of the axlebox mounts and lozenging of side frames show the displacements that correspond to the break of the frictional forces during the car negotiation into a curve with 290 m radius. Based on the processing of the test results, it has been established that the magnitude of the longitudinal displacements of the axlebox mounts Δx_{sf-ws} increase slightly with increasing velocity. The largest values ΔX_{11} did not exceed 3-4 mm for the first car, regardless of the radius of the curve. For the second car during the movement in the curve $R=290$ m the greatest values ΔX_{21} did not exceed 2-3 mm, and in the curve $R=600$ m – 1-1.5 mm. For the third car, the values ΔX_{31} in the curve $R=290$ m did not exceed 3.5 mm, and in the curve $R=600$ m – 2-3 mm. For comparison:

the longitudinal displacement of the boxes relative to the flat car side frames in the curve $R=600$ m according to the results of the calculations was 0.5-2 mm, and lozenging of bogie side frames 17-22 mm in the velocity interval $50 \div 80$ km/h for all variants of the load gravity center displacement. Somewhat lower values of the parameters can be explained by the larger truck-center spacing.

Taking into account the fact that the experimental train for conducting dynamic (running) tests was formed from the gondola cars of the model 12-532, and the theoretical calculations are given for the flat car of the model 13-401, we note that the obtained results have a rather high coincidence. The results of calculations, as well as the data of experiments, indicate that the wear indicators in these cases, in general, grow with increasing speed. The value of wear indicators for other equal conditions during the movement of cars in the curve with 300 m radius is higher than during movement in the curve with 600 m radius.

Originality and practical value

In the process of research, we obtained the following scientific and practical results:

- Mathematical model of coupling of five freight cars was used to study the effect of the loading characteristics of the flat car on the value of the wheel-rail pair wear factor;
- There are assessed such indicators as the wear factor, the directional force, and hunting of the wheel set of freight rolling stock in the event of load gravity centre displacement when moving along curved sections of the railway track;
- To establish the possible cause of intensive wear of the wheels and rails, the following parameters were analysed: lozenge of front bogie side frames; hunting of the left side frame of the front bogie; mutual longitudinal movement of the side frame and axle box of the front wheel set; mutual hunting of the left side frame of the bogie relative to the front wheel set;
- The influence of speed on the mentioned indicators is investigated.

Conclusions

Based on the analysis of theoretical studies conducted on the example of a flat car, the following conclusions can be drawn:

- Lozenge of bogie side frames of a flat car in the range of speeds of 50-80 km/h does not affect the factor of wear of wheels and rails both at longitudinal and transverse displacement of the load mass center;
- Longitudinal displacement of load on flat cars does not cause an increase in the studied parameters;
- The most probable reason for the intensive wear of wheels and rails under the same conditions of motion is the temporary change in the running characteristics of some carriages, namely, an increased angle of climbing of individual wheels due to the bogie rotation relative to the track or due to the rotation of the wheel set axle due to the box shift in the bogie side frame openings.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бороненко, Ю. П. Инновации в тележках грузовых вагонов: реальность и перспективы / Ю. П. Бороненко, Е. А. Рудакова, А. М. Орлова // Наука и транспорт. – 2009. – № 5. – С. 14–17.
2. Данович, В. Д. Колебания в горизонтальной плоскости 4-осн. платформы с несимметрично расположенным тяжеловесным грузом / В. Д. Данович, П. С. Анисимов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1989. – № 3. – С. 5–9.
3. 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.
4. Данович, В. Д. Пространственные колебания вагонов на инерционном основании : дис. д-ра техн. наук : 05.22.07 / Данович Виктор Данилович ; Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1981. – 465 с.
5. Знос коліс та рейок при нерівномірному завантаженні піввагонів / Анжела О. Швець, О. М. Болотов, Л. С. Сапарова, Анжеліка О. Швець // Вісн. сертифікації залізн. трансп. – 2019. – № 1. – С. 4–17.
6. Определение показателей безопасности движения платформ с порожним автопоездом / А. В. Шатунов, В. В. Соборницкая, Е. Н. Ковтун, О. М. Маркова // Транспорт : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 7. – С. 116–120.
7. Петров, Г. И. Модернизация грузовых тележек: установка поперечной связи / Г. И. Петров, Н. Ю. Черняев, М. А. Мещеряков // Мир транспорта. – 2015. – № 5. – С. 58–62.
8. Разработка рекомендаций по снижению износа колес и рельсов за счет снижения сил динамического взаимодействия железнодорожных экипажей и пути с учетом стационарных и нестационарных режимов движения. В 3 т. Т. 3. Натурные исследования факторов, влияющих на повышенный износ рельсов и гребней колес грузовых вагонов : отчет о НИР (заключ.) : 91.134.95.97/379.95.97 ЦТех / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна ; рук. Блохин Е. П., Пшинько А. Н. ; исп.: Данович В. Д. [и др.]. – Днепропетровск, 1998. – 190 с. – № ГР 0196U023134. – Инв. № 416(III).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

9. Совершенствование конструкции тележек грузовых вагонов с целью снижения износа гребней колес и рельсов / И. Э. Мартынов, В. Г. Маслиев, С. Д. Мокроусов, В. П. Щербаков, В. И. Нестеренко // 36. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – 2013. – Вип. 139. – С. 25–34.
10. Теоретическая оценка динамических качеств платформ, нагруженных автопоездом с грузом / А. В. Шатунов, В. В. Соборницкая, Е. Н. Ковтун, О. М. Маркова // Транспорт : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 2000. – Вып. 3. – С. 21–27.
11. Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). – Київ : Девольта, 2011. – Т. 1. – 436 с.
12. Шатунов, А. В. Нагруженность сцепа из двух платформ при ресурсосберегающем способе транспортировки длинномерных грузов : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.07 / Шатунов Александр Васильевич ; Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1992. – 17 с.
13. Швець, А. О. Вплив позовжнього 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: <http://doi.org/10.15802/stp2018/146432>
14. Ashtiani, H. Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight cars with three-piece bogies / H. Ashtiani, S. Rakheja, A. K. W. Ahmed // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2017. – Vol. 231. – Iss. 8. – P. 877–891. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409716647095>
15. Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear / E. P. Blokhin, O. M. Pshinko, V. D. Danovich, M. L. Korotenko // Railway Bogies and Running Gears : Proc. of the 4th Intern. Conf. / Technical University of Budapest. – Budapest, 1998. – P. 313–323.
16. Effects of profile wear on wheel-rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout / J. Xu, P. Wang, L. Wang, R. Chen // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 1–14. doi: <http://doi.org/10.1177/1687814015623696>
17. Generation mechanism and remedy method of rail corrugation at a sharp curved metro track with Vanguard fasteners [Електронний ресурс] / B. W. Wu, G. X. Chen, J. Z. Lu, Q. Zhu, X. Kang // Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control. – 2019. – Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1461348419845992> – Назва з екрана. – Перевірено : 26.06.2019. doi: <http://doi.org/10.1177/1461348419845992>
18. Lack, T. Freight car bogie properties analysis by means of simulation computations / T. Lack, J. Gerlici, M. Manurova // Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 16. – Iss. 4. – P. 733–739.
19. Light weight freight rolling stock bogie frame: Design methodology validated with field oscillation trials / S. Shukla, U. Kumar, S. K. Sharma, P. Gupta, A. Kumar // International Journal of Vehicle Structures and Systems. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 245–250. doi: <http://doi.org/10.4273/ijvss.9.4.10>
20. Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics / C. Cole, M. Spiryagin, Q. Wu, Y. Q. Sun // Vehicle System Dynamics. – 2017. – Vol. 55. – Iss. 10. – P. 1498–1571. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2017.1330484>
21. Shatunov, O. V. Study of dynamic indicators of flat car with load centre shift / O. V. Shatunov, A. O. Shvets // Наука та прогрес транспорту. – 2019. – № 2 (80). – С. 127–143. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/165160>
22. Wu, Q. Longitudinal train dynamics: an overview / Q. Wu, M. Spiryagin, C. Cole // Vehicle System Dynamics. – 2016. – Vol. 54. – Iss. 12. – P. 1688–1714. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988>
23. Ye, Y. Small-amplitude hunting diagnosis method for high-speed trains based on the bogie frame's lateral-longitudinal-vertical data fusion, independent mode function reconstruction and linear local tangent space alignment [Електронний ресурс] / Y. Ye, J. Ning // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2019. – Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954409718825412> – Назва з екрана. – Перевірено : 26.06.2019. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409718825412>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

О. В. ШАТУНОВ^{1*}, А. О. ШВЕЦЬ^{2*}, О. А. КИРИЛЬЧУК^{3*}, А. О. ШВЕЦЬ^{4*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 953 60 14, ел. пошта shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

^{2*}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

^{3*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 27, ел. пошта kirilchuk.o@mail.ru, ORCID 0000-0002-0565-1692

^{4*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 235 19 67, ел. пошта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-0717-2521

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ КОЛІС ТА РЕЙОК ЗА НЕСИМЕТРИЧНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ПЛАТФОРМИ

Мета. У науковій роботі потрібно провести визначення впливу несиметричного завантаження вагона-платформи на величину фактора зносу пари «колесо–рейка» в разі зміни параметрів, що мають місце в експлуатації. **Методика.** Динамічну навантаженість вагона-платформи моделі 13–401 з типовими трьохелементними візками досліджено з використанням моделі просторових коливань зчепу з п'яти вагонів за допомогою математичного й комп'ютерного моделювання. Теоретичні розрахунки виконано для найбільш небезпечних ділянок залізничної колії – кривих малого й середнього радіуса в інтервалі допустимих швидкостей руху. **Результати.** Проаналізовано показники зносу коліс рухомого складу й рейок на прикладі вагонів-платформ за наявності поздовжнього й поперечного зміщення центра мас вантажу відносно центра симетрії вагона. Для отримання інформації про вплив допустимих відхилень розташування вантажу у вагоні на величину динамічної навантаженості контакту «колесо–рейка» виконано теоретичні дослідження просторових коливань рейкового екіпажу та його взаємодії з колією. **Наукова новизна.** Для визначення зносу пари «колесо–рейка» досліджено вплив зміщення у двох напрямках від центральної осі симетрії центра мас вантажу з огляду на величину швидкості руху по кривих ділянках колії малого й середнього радіуса із застосуванням математичної моделі зчепу з п'яти вантажних вагонів. **Практична значимість.** У результаті проведених теоретичних досліджень оцінено такі показники, як фактор зносу, напрямлена сила й виляння колісної пари вантажного рухомого складу в разі зміщення центра мас вантажу під час руху по криволінійних ділянках залізничної колії. Для встановлення ймовірної причини інтенсивного зносу коліс і рейок проаналізовано параметри: забігання бокових рам переднього візка; виляння лівої бокової рами переднього візка; взаємне поздовжнє переміщення бокової рами й буксового вузла передньої колісної пари; взаємне виляння лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари.

Ключові слова: вантаж; вагон-платформа; забігання бокових рам візка; зміщення центра тяжіння вантажу; кут виляння колісної пари; швидкість руху; фактор зносу

А. В. ШАТУНОВ^{1*}, А. А. ШВЕЦЬ^{2*}, О. А. КИРИЛЬЧУК^{3*}, А. А. ШВЕЦЬ^{4*}

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 953 60 14, эл. почта shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

^{2*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

^{3*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 27, эл. почта kirilchuk.o@mail.ru, ORCID 0000-0002-0565-1692

^{4*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 235 19 67, эл. почта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-0717-2521

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА КОЛЕС И РЕЛЬСОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАГРУЗКЕ ПЛАТФОРМЫ

Цель. В научной работе нужно провести определение влияния несимметричной загрузки вагона-платформы на величину фактора износа пары «колесо–рельс» при изменении параметров, имеющих место в эксплуатации. **Методика.** Динамическую нагруженность вагона-платформы модели 13–401 с типовыми трехэлементными тележками исследовано с использованием модели пространственных колебаний сцепа из пяти вагонов с помощью математического и компьютерного моделирования. Теоретические расчеты выполнены для наиболее опасных участков железнодорожного **пути – кривых** малого и среднего радиуса в интервале допустимых скоростей движения. **Результаты.** Проанализированы показатели износа колес подвижного состава и рельсов на примере вагонов-платформ при наличии продольного и поперечного смещения центра масс груза относительно центра симметрии вагона. Для получения информации о влиянии допустимых отклонений расположения груза в вагоне на величину динамической нагруженности контакта «колесо–рельс» выполнены теоретические исследования пространственных колебаний рельсового экипажа и его взаимодействия с колеей. **Научная новизна.** Для определения износа пары «колесо–рельс» исследовано влияние смещения в двух направлениях от центральной оси симметрии центра тяжести груза с учетом величины скорости движения по кривых участках пути малого и среднего радиуса с применением математической модели сцепа из пяти грузовых вагонов. **Практическая значимость.** В результате проведенных теоретических исследований оценены такие показатели, как фактор износа, направленная сила и влияние колесной пары грузового подвижного состава в случае смещения центра тяжести груза при движении по криволинейным участкам железнодорожного пути. Для установления возможной причины интенсивного износа колес и рельсов проанализированы параметры: забегание боковых рам передней тележки; влияние левой боковой рамы передней тележки; взаимное продольное перемещение боковой рамы и буксового узла передней колесной пары; взаимное влияние левой боковой рамы тележки относительно передней колесной пары.

Ключевые слова: груз; вагон-платформа; забегание боковых рам тележки; смещение центра тяжести груза; угол влияния колесной пары; скорость движения; фактор износа

REFERENCES

1. Boronenko, Y. P., Rudakova, Y. A., & Orlova, A. M. (2009). Innovatsii v telezhkakh gruzovykh vagonov: realnost i perspektivy. *Nauka i transport*, 5, 14-17. (in Russian)
2. Danovich, V. D., & Anisimov, P. S. (1989). Kolebaniya v gorizontальной ploskosti 4-osn. platformy s nesimmetrichno raspolozhennym tyazhelovesnym gruzom. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 3, 5-9. (in Russian)
3. 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. In *Transport. Stress loading and durability of a rolling stock* (pp. 62-69). Dnepropetrovsk. (in Russian)
4. Danovich, V. D. (1981). *Spatial Cars Oscillations in Inertia Track*. (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering, Dnepropetrovsk. (in Russian)
5. Shvets, Angela O., Bolotov, O. M., Saparova, L. S., & Shvets, Angelika O. (2019). Wear Wheels and Rails at the Uneven Loading of Gondola Cars. *Visnyk sertyfikatsii zaliznychnoho transportu*, 1(53), 4-17. (in Ukrainian)
6. Shatunov, A. V., Sobornitskaya, V. V., Kovtun, E. N., & Markova, O. M. (2001). Opredelenie pokazatelej bezopasnosti dvizheniya platform s porozhnim avtopoezdom. *Transport*, 7, 116-120. (in Russian)
7. Petrov, G. I., Chernyaev, N. Y., & Meshcheryakov, M. A. (2015). Modernization of Cargo Bogies: Mounting of a Transverse Connection Assembly. *Mir transporta*. 5, 58-62. (in Russian)
8. Blokhin, E. P., Pshinko, O. M., & Danovich, V. D. (1998). *Razrabotka rekomendatsiy po snizheniyu iznosa koles i relsov za schet snizheniya sil dinamicheskogo vzaimodeystviya zheleznodorozhnykh ekipazhey i puti s uchetom statsionarnykh i nestatsionarnykh rezhimov dvizheniya* (Vol. 1-3). Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk. (in Russian)
9. Martynov, I. E., Masliev, V. G., Mokrousov, S. D., Nesterenko, V. I., & Shcherbakov, V. P. (2013). Improved design cargo trucks-cars out to prevent wear paddle wheels and rails. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*, 139, 25-34. (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

10. Shatunov, A. V., Sobornitskaya, V. V., Kovtun, E. N., & Markova, O. M. (2000). Teoreticheskaya otsenka dinamicheskikh kachestv platform, zagruzhennykh avtopoezdom s gruzom. *Transport*, 3, 21-27. (in Russian)
11. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov. Prilozhenie 3 k Soglasheniyu o mezhduнародном zheleznodorozhnom gruzovom soobshchenii (SMGS)*. (2011). Kyiv: Devolta. (in Russian)
12. Shatunov, A. V. (1992). *Nagruzhennost stsepa iz dvukh platform pri resursosberegayushchem sposobe transportirovki dlinnomernykh gruzov*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering, Dnepropetrovsk. (in Russian)
13. Shvets, A. O. (2018). Influence of the longitudinal and transverse displacement of the cargo gravity center in gondola cars on their dynamic indicators. *Science and Transport Progress*, 5(77), 115-128. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/146432> (in Ukrainian)
14. Ashtiani, H., Rakheja, S., & Ahmed, A. K. W. (2017). Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight cars with three-piece bogies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(8), 877-891. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409716647095> (in English)
15. Blokhin, E. P., Pshinko, O. M., Danovich, V. D., & Korotenko, M. L. (1998). Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear. *Railway Bogies and Running Gears: Proceedings of the 4th International Conference* (pp. 313-323). Budapest. (in English)
16. Xu, J., Wang, P., Wang, L., & Chen, R. (2016). Effects of profile wear on wheel-rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(1), 1-14. doi: <http://doi.org/10.1177/1687814015623696> (in English)
17. Wu, B. W., Chen, G. X., Lu, J. Z., Zhu, Q., & Kang, X. (2019). Generation mechanism and remedy method of rail corrugation at a sharp curved metro track with Vanguard fasteners. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*. doi: <http://doi.org/10.1177/1461348419845992> (in English)
18. Lack, T., Gerlici, J., & Manurova, M. (2016). Freight car bogie properties analysis by means of simulation computations. *Manufacturing Technology*, 16(4), 733-739. (in English)
19. Shukla, S., Kumar, U., Sharma, S. K., Gupta, P., & Kumar, A. (2017). Light weight freight rolling stock bogie frame: Design methodology validated with field oscillation trials. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 9(4), 245-250. doi: <http://doi.org/10.4273/ijvss.9.4.10> (in English)
20. Cole, C., Spiryagin, M., Wu, Q., & Sun, Y. Q. (2017). Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 55(10), 1498-1571. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2017.1330484> (in English)
21. Shatunov, O. V., & Shvets, A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat car with load centre shift. *Science and Transport Progress*, 2(80), 127-143. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/165160> (in English)
22. Wu, Q., Spiryagin, M., & Cole, C. (2016). Longitudinal train dynamics: an overview. *Vehicle System Dynamics*, 54(12), 1688-1714. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988> (in English)
23. Ye, Y., & Ning, J. (2019). Small-amplitude hunting diagnosis method for high-speed trains based on the bogie frame's lateral-longitudinal-vertical data fusion, independent mode function reconstruction and linear local tangent space alignment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409718825412> (in English)

Received: March 11, 2019

Accepted: July 08, 2019

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

- М. М. БІЛЯЄВ, Т. І. РУСАКОВА,
І. В. КАЛАШНИКОВ, В. В. ГІЛЬОВ,
О. Ю. ГУНЬКО**
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ
ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД ВІДВАЛІВ 7
- В. В. БІЛЯЄВА, П. С. КІРІЧЕНКО, О. В. БЕРЛОВ,
В. О. ГАБРИНЕЦЬ, В. М. ГОРЯЧКІН**
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ
АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПРИ РУСІ ПИЛОВОЇ
ХМАРИ В КАР'ЄРІ 18
- Л. Ф. ДОЛИНА, П. Б. МАШИХІНА, Д. А. ДОЛИНА**
ТЕХНОЛОГІЯ Й ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ ДЛЯ
ОЧИСТКИ ВОД ВІД ЗАЛИШКІВ ЛІКАРСЬКИХ
ПРЕПАРАТІВ ТА ПЛАСТИКУ 26
- О. Я. ОЛІЙНИК, С. М. КУРГАНСЬКА,
Т. С. АЙРАПЕТЯН**
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АЕРОТЕНКІВ ЗА
РАХУНОК ДОДАТКОВОГО ВЛАШТУВАННЯ
ЗАКРІПЛЕНОГО БІОЦЕНОЗУ 37

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- Д. М. КОЗАЧЕНКО, Ю. М. ГЕРМАНЮК,
Е. К. МАНАФОВ**
ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ НА ОСНОВІ
СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ..... 47

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- І. О. БОНДАРЕНКО, Л. О. НЕДУЖА**
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІКИ РУХОМОГО
СКЛАДУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ
ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ КОЛІЇ..... 61

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- З. М. ГАСАНОВ**
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОПТИМІЗАЦІЇ
ІНВЕСТИЦІЙ НА РОЗВИТОК ПІДПРИЄМСТВА
З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВИХ ВИТРАТ..... 74
- А. РОЗАНДІ, М. АГУСТІЄН, Д. АРЛАНСЯ**
АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОЇЗДОК УЧНІВ
І МОЖЛИВОСТІ ЗДІЙСНЕННЯ ШКІЛЬНОГО
АВТОБУСНОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ..... 82

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- В. В. КЛОЧИХІН, О. Б. МИЛОСЕРДОВ,
О. С. ПОДороГА, В. Г. МІЩЕНКО**
ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА
ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 09ХЗНМЗФБЧ ПІД ЧАС
ХІМІКО-ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ..... 92

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- О. В. ШАТУНОВ, А. О. ШВЕЦЬ, О. А. КИРИЛЬЧУК,
А. О. ШВЕЦЬ**
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ КОЛІС ТА РЕЙОК ЗА
НЕСИМЕТРИЧНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ
ПЛАТФОРМИ..... 102

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, Т. И. РУСАКОВА,
И. В. КАЛАШНИКОВ, В. В. ГИЛЁВ,
Е. Ю. ГУНЬКО**
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ОТ ОТВАЛОВ..... 7

**В. В. БЕЛЯЕВА, П. С. КИРИЧЕНКО, А. В. БЕРЛОВ,
В. А. ГАБРИНЕЦ, В. Н. ГОРЯЧКИН**
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ ДВИЖУЩЕМСЯ
ПЫЛЕВОМ ОБЛАКЕ В КРЬЕРЕ..... 18

Л. Ф. ДОЛИНА, П. Б. МАШИХИНА, Д. А. ДОЛИНА
ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЛЯ
ОЧИСТКИ ВОД ОТ ОСТАТКОВ ЛЕКАРСТВЕННЫХ
ПРЕПАРАТОВ И ПЛАСТИКА..... 26

**А. Я. ОЛЕЙНИК, С. Н. КУРГАНСКАЯ,
Т. С. АЙРАПЕТЯН**
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЭРОТЕНКОВ
ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА
ПРИКРЕПЛЕННОГО БИОЦЕНОЗА 37

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

**Д. Н. КОЗАЧЕНКО, Ю. Н. ГЕРМАНИЮК,
Э. К. МАНАФОВ**
ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ НА
ОСНОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ 47

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ

И. А. БОНДАРЕНКО, Л. А. НЕДУЖАЯ
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ
ПУТИ..... 61

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

З. М. ГАСАНОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПТИМИЗАЦИИ
ИНВЕСТИЦИЙ НА РАЗВИТИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ
С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ЗАТРАТ 74

А. РОЗАНДИ, М. АГУСТИЕН, Д. АРЛИАНСЯ
АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЕЗДОК УЧЕНИКОВ
И ВОЗМОЖНОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ШКОЛЬНЫХ
АВТОБУСНЫХ ПЕРЕВОЗОК 82

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**В. В. КЛОЧИХИН, А. Б. МИЛОСЕРДОВ,
А. С. ПОДОРОГА, В. Г. МИЩЕНКО**
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
И СВОЙСТВ СТАЛИ 09Х3НМЗФбч ПРИ ХИМИКО-
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ 92

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

**А. В. ШАТУНОВ, А. А. ШВЕЦ, О. А. КИРИЛЬЧУК,
А. А. ШВЕЦ**
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА КОЛЕС И РЕЛЬСОВ ПРИ
НЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАГРУЗКЕ ПЛАТФОРМЫ 102

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

**M. M. BILIAIEV, T. I. RUSAKOVA,
I. V. KALASHNIKOV, V. V. HILOV, E. Y. GUNKO**
NUMERICAL MODELING OF AIR POLLUTION FROM
DUMPS 7

**V. V. BILIAIEVA, P. S. KIRICHENKO, O. V. BERLOV,
V. A. GABRINETIS, V. N. GORYACHKIN**
NUMERICAL HA COMPUTER COMPUTER MODELING
OF AIR POLLUTION IN CASE OF DUST CLOUD
MOVEMENT IN OPEN PIT MINE 18

L. F. DOLINA, P. B. MASHYKHINA, D. A. DOLINA
TECHNOLOGY AND TECHNOLOGICAL SCHEMES
FOR WATER PURIFICATION FROM RESIDUES
OF DRUGS AND PLASTIC 26

**O. Y. OLEYNIK, S. M. KURGANSKA,
T. S. AIRAPETIAN**
EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF AERATED
LAGOONS DUE TO ADD-ON ATTACHED
BIOCENOSIS 37

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

**D. M. KOZACHENKO, Y. N. HERMANIUK,
E. K. MANAFOV**
CONTROL ORGANIZATION OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES OF RAILWAY STATIONS ON THE BASIS
OF STATISTICAL METHODS 47

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

I. O. BONDARENKO, L. O. NEDUZHA
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE
ROLLING STOCK DYNAMICS ON THE INTENSITY
OF USING THE RAILWAY TRACK ELEMENTS 61

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

Z. M. GASANOV
MODELING THE OPTIMIZATION PROCESS
OF INVESTMENTS IN DEVELOPMENT OF THE
ENTERPRISE TAKING INTO ACCOUNT RANDOM
COSTS 74

A. ROZANDI, M. AGUSTIEN, J. ARLIANSYAH
THE ANALYSIS OF TRAVEL CHARACTERISTICS AND
THE SCHOOL BUS PROVISION PLAN BASED ON
STUDENTS' TRANSPORTATION MODE 82

MATERIAL SCIENCE

**V. V. KLOCHIKHIN, O. B. MILOSERDOV,
O. S. PODOROHA, V. H. MISHCHENKO**
FEATURES OF FORMATION OF THE STRUCTURE AND
PROPERTIES OF STEEL 09Cr3NiMo3VNb DURING
THERMOCHEMICAL TREATMENT 92

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

**O. V. SHATUNOV, A. O. SHVETS, O. A. KIRILCHUK,
A. O. SHVETS**
RESEARCH OF WHEEL-RAIL WEAR DUE TO
NON-SYMMETRICAL LOADING
OF A FLAT CAR 102

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 запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

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/>

Наукове видання

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

№4 (82) 2019

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 14,18. Тираж 100 пр. Зам. №02/04

**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**

№ 4 (82) 2019

(на українском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Помінова

Компьютерная верстка – О. В. Помінова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 14,18. Тираж 100 экз. Зак. №02/04

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адрес редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Печать:

Издательство «Герда», 49000, г. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 4 (82) 2019

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 14,18. Circulation 100. Order no. 02/04

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

