



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 1 (73)

.. 2018 ..

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 1 (73) 2018

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

Наука та прогрес транспорту
Автоматизовані системи управління на транспорті
Екологія на транспорті
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт
Залізнична колія
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Моделювання задач транспорту та економіки
Нетрадиційні види транспорту. Машини та механізми
Промисловий транспорт
Рухомий склад залізниць і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2018

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

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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):

Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакулєнко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилюк В. І., Гєтьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головокова Л. С., Гончаров К. В., Горобєць В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейтутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Настєчик М. П., Нетєса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. І., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Інститут залізничного транспорту, Варшава, Рєспубліка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гєдимінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенєргєтики Лодзинської політехніки, Рєспубліка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богємії, Чєська Рєспубліка); Зіммер К. (Інститут Електротєхніки Варшавської політехніки, Рєспубліка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Рєспубліка Казахстан); Лінгайтіс В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гєдимінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Рєспубліка Польща); Стржелицькі Р. (Гданська морська академія, Рєспубліка Польща); Тітова Т. С. (Пєтербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олєксандра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Рєспубліка Польща); Шєпонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Рєспубліка Польща).

Журнал зарєєстровано Дєржавною рєєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідєцтво про рєєстрацію KB № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р. Видання внесєно до Перєліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освїти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки). Журнал зарєєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін. Друкуєтьєся за рїшенням вченої ради університету від 01.03.2018 р., протокол № 7

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

Адреса засновника та редакції вул. Лазаряна, 2, кїм. 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 публікуєтьєся з 1936 р.:

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

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 1 (73) 2018

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

Наука и прогресс транспорта
Автоматизированные системы управления на транспорте
Экология на транспорте
Экономика и управление
Эксплуатация и ремонт средств транспорта
Электрический транспорт
Железнодорожный путь
Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование
Материаловедение
Моделирование задач транспорта и экономики
Нетрадиционные виды транспорта. Машины и механизмы
Промышленный транспорт
Подвижной состав железных дорог и тяга поездов
Транспортное строительство

Днепро

2018

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

*ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА*

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Мямлин С. В., доктор технических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук
по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):

Афанасов А. М., Банников Д. О., Бараш Ю. С., Беляев Н. Н., Бобырь Д. В., Бобровский В. И., Боднарь Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Власова Т. И., Волкова В. Е., Габринец В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Гненний О. Н., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Доценко Е. Н., Дудкина В. В., Жуковицкий И. В., Заблудовский В. А., Казакевич М. И., Капица М. И., Копытко В. И., Костин Н. А., Кравец В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган Н. Б., Муха А. М., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Оковитый С. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. И., Штапенко Э. Ф., Эйтулис Г. Д., Яришкина Л. А.

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).
Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др.
Печатается по решению ученого совета университета от 01.03.2018 г., протокол № 7

Издатель

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

Адрес
учредителя

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

Издание публикуется с 1936 г.:

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

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

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

Scientific journal

No. 1 (73) 2018

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

Science and Transport Progress
Transport Automated Control Systems
Transport Ecology
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport
Railway Track
Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling
Material Science
Transport and Economic Tasks Modeling
Non-Traditional Transport Modes. Machines and Mechanisms
Industrial Transport
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro
2018

Founder:

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

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

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

EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):

Afanasov A. M., Bannikov D. O., Barash Yu. S., Biliaiev M. M., Bobrovskiy V. I., Bobyr D. V., Bodnar B. J., Bosov A. A., Crivchick G. G., Dotsenko O. M., Dudkina V. V., Eitutis H. D., Gabrync V. A., Gavrilyuk V. I., Getman G. K., Glavatskiy K. Ts., Hnennyi O. M., Golovkova L. S., Goncharov K. V., Gorobets V. L., Kapitsa M. I., Kazakevich M. I., Kopytko V. I., Kostin M. O., Krasnyuk A. V., Kravets V. V., Kurgan M. B., Kuznetsov V. G., Mukha A. M., Nastechik N. P., Netesa N. I., Ochkasov O. B., Okovytyy S. I., Petrenko V. D., Pichugov S. O., Pichurin V. V., Polishko T. V., Radchenko N. A., Radkevych A. V., Raksha S. V., Shtapenko E. P., Shynkarenko V. I., Skalozub V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Vlasova T. I., Volkova V. Ye., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovytsky I. V.

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Bialon A. (Railway Institute, Warszawa, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Dolezel I. (The University of West Bohemia, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kuanyshev B. M. (Kazakh Academy of Transport and Communications, Republic of Kazakhstan); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», USA); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime Academy, Republic of Poland); Szeląg Adam (Warsaw University of Technology, Republic of Poland), Titova T. S. (Petersburg State Transport University, Russian Federation); Vaiciunas G. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Wasiak I. (Institute of Electrical Power Engineering, Republic of Poland); Zymmer K. (Electrotechnical Institute, Republic of Poland)

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 г. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 01.03.2018, Protocol no. 7
Publisher	Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:

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

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 502.3:504.5

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, И. В. КАЛАШНИКОВ^{2*}, В. А. КОЗАЧИНА^{3*}

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

^{2*}Гос. предприятие «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта «Укрзализнычпроект», ул. Красноармейская, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

РАСЧЕТ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА ПРИ ТЕРАКТЕ: ЭКСПРЕСС МОДЕЛЬ

Цель. Работа предполагает разработку метода оценки территориального риска в случае теракта с использованием химического агента. **Методика.** Для описания процесса рассеивания в атмосфере химического агента, выброшенного в случае теракта, используется уравнение массопереноса примеси в атмосферном воздухе. Уравнение учитывает скорость ветрового потока, атмосферную диффузию, интенсивность эмиссии химического агента, наличие зданий возле места выброса химически опасного вещества. Для численного интегрирования моделирующего уравнения используется конечно-разностный метод. Особенностью разработанной численной модели является возможность оценки территориального риска в случае теракта при различных метеоусловиях и наличии зданий. **Результаты.** Разработана специализированная численная модель и пакет программ, которые могут быть использованы для оценки территориального риска как в случае терактов с применением химических агентов, так и в случае экстремальных ситуаций на химически опасных объектах и транспорте. Метод может быть реализован на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать его для решения задач рассматриваемого класса. Представлены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности предложенного метода оценки территориального риска в случае теракта с использованием химического агента. **Научная новизна.** Предложен эффективный метод оценки территориального риска в случае теракта с применением химически опасного вещества. Метод может быть использован для оценки территориального риска в условиях городской застройки, что позволяет получать адекватные данные о возможных зонах поражения. Метод основан на численном интегрировании фундаментального уравнения массопереноса, выражающего закон сохранения массы в жидкой среде. **Практическая значимость.** Предложенный метод оценки территориального риска в случае теракта с применением химического агента может быть использован для расчета зон поражения возле административных зданий, центров и других социально значимых объектов.

Ключевые слова: территориальный риск; теракт; химическое загрязнение; численное моделирование; загрязнение воздушной среды

Введение

В настоящее время за рубежом повышенное внимание уделяется прогнозу последствий террористических актов с возможным применением химических или биологических агентов [1,

2, 3, 8, 9, 11]. Как отмечают зарубежные исследователи, сейчас высока доступность для террористов тех химически опасных веществ, которые используются в различных отраслях промышленности (например, хлор, аммиак и т.п.). В этой связи, за рубежом при изучении проблемы оценки последствий терактов часто

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

рассматривается эмиссия именно таких химически опасных веществ и, реже, боевых отравляющих веществ [6, 7].

Известно, что теракты чаще происходят в условиях застройки (промышленной застройки или в селитебной зоне). В этой связи, для оценки последствий возможного теракта в создаваемых математических моделях обязательно следует учесть влияние зданий на рассеивание химического (биологического) агента. Однако, следует отметить, что такой учет крайне осложняет решение задачи, поскольку для прогноза возможных зон поражения следует знать поле скорости ветрового потока между зданиями, которое надо рассчитать для всех возможных метеоситуаций. Для решения данной задачи необходимо решить аэродинамическую задачу и определить это поле скорости.

Цель

Целью данной работы является разработка метода оценки территориального риска при террористической атаке, сопровождающейся эмиссией химического агента в условиях застройки. Метод расчета основывается на создании численной модели рассеивания химического агента при теракте.

Анализ публикаций. В настоящее время в Украине не разрабатываются методы по оценке последствий терактов (с применением химических или биологических агентов) в условиях застройки. Существуют публикации, где используются нормативные методики типа ОНД-86 или методика прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте для оценки уровня загрязнения воздушной среды при выбросе химически опасных веществ. Для оценки такого уровня загрязнения при авариях на производствах используются методики типа «Токси» [4], «Аммиак», «SLAB» [6], реализующие модель Гаусса, или аналитическое решение уравнения массопереноса, которые также не могут быть применены, поскольку не учитывают влияние зданий на рассеивание химического (биологического) агента. Одним из подходов к оценке территориального риска при экстремальных ситуациях на транспорте является применение численных кинематических моделей и др. [3, 4, 10, 12]. Следует отметить, что применение данных мо-

делей ограничено только случаем рассеивания химически опасных веществ над ровной поверхностью. Следовательно, применять данные модели для оценки последствий терактов в условиях застройки нельзя.

Методика

Методика – создание 2D численной модели для расчета аэродинамики обтекания зданий и оценки территориального риска при теракте на урбанизированной территории.

Моделирующие уравнения. Для создания адекватной модели прогноза последствий теракта с применением химического (биологического) агента необходимо учесть неравномерное поле скорости ветра при наличии застройки. В этой связи для расчета поля скорости ветрового потока при наличии зданий будем использовать модель безвихревого течения идеальной жидкости:

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

где P – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости ветрового потока определяются соотношениями:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2)$$

Для математического моделирования процесса распространения химического агента (биологического агента) в атмосферном воздухе применяется уравнение массопереноса, осредненное по высоте переноса примеси [2, 3, 5, 8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

где C – концентрация химического (биологического) агента в атмосферном воздухе; σ – коэффициент, учитывающий распад агента; u, v – компоненты вектора скорости воздушного потока; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса химического (биологического) агента; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функция

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Дирака; x_i, y_i – координати источника эмиссии агента; t – время.

Таким образом, для расчета вероятности попадания в зону поражения (то есть для оценки величины территориального риска) необходимо выполнить расчеты для конкретного рецептора по формуле (3). Необходимо подчеркнуть, что для решения поставленной задачи надо знать концентрацию опасного вещества в точке расположения конкретного рецептора и насколько эта величина превосходит некоторый пороговый уровень (например, ПДК или какую-либо другую величину). Следовательно, мы приходим к первоочередной задаче – определению поля концентрации опасного вещества для конкретного региона (территории) и конкретной метеоситуации.

Поле скорости ветрового потока в условиях застройки по моделирующему уравнению (3) определяется на основе решения аэродинамической задачи, т. е. путем решения уравнения (1). Постановка краевых условий для моделирующих уравнений (1), (2) рассмотрена в [2, 3, 5].

Для численного интегрирования уравнения (1) используется метод Либмана, а для численного интегрирования уравнения переноса примеси применяется неявная разностная схема расщепления [2, 5].

Расчет территориального риска. Для оценки территориального риска при теракте с применением химического агента будем учитывать, что каждому погодному состоянию $P(W_i)$ отвечает конкретная зона загрязнения, характеризующаяся размерами и концентрацией опасного вещества. Вероятность реализации конкретной метеоситуации определяется по зависимости [1]:

$$P(W_i) = N_{II} / T, \quad (4)$$

где N_{II} – число дней (часов), соответствующих определенной метеоситуации; T – период наблюдений (прогноз метеоситуации).

Здесь под определенной метеоситуацией будем понимать конкретное значение скорости и направления ветра. Для оценки потенциального территориального риска необходимо оценить вероятность для человека, находящегося в каждой точке области, возле атакуемого объекта, оказаться под действием шлейфа (облака)

химически опасного вещества. При прогнозе нас интересуют те точки области в районе теракта, где концентрация химически опасного вещества превышает некоторое пороговое значение, при котором происходит та или иная степень поражения людей. Схематически на рис. 1 показана ситуация попадания рецепторов А, В, С под действие источника эмиссии (баллона, в котором находится токсичный газ), причем отметим, что выброс происходит в условиях застройки.



Рис. 1. Вероятность появления зон поражения для различных метеословий: 1 – здание

Fig. 1. Probability of occurrence of damage areas for various weather conditions: 1 – building

Как видно из рис. 1, человек, находящийся в точке А, попадает под воздействие шлейфа опасного вещества при любой метеоситуации. Человек, который расположен в точке В, попадает под воздействие шлейфа опасного вещества при метеоситуации PW_2 , PW_3 . Человек, находящийся в точке С, попадает под воздействие шлейфа опасного вещества только при метеоситуации PW_3 . Таким образом, вероятность попадания человека под действие шлейфа химически опасного вещества определится следующим образом:

$$P(W)_{\Sigma} = \sum_{i=0}^n P(W_i), \quad (5)$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

где $P(W)_{\Sigma}$ – суммарная вероятность всех рассматриваемых метеоситуаций, при которых человек попадает в зону воздействия источника эмиссии и получает токсичное поражение.

Таким образом, при прогнозировании химической атаки террориста необходимо для конкретной точки конкретной области (поля), выполнить расчеты по формуле (5). Для их выполнения предварительно необходимо рассчитать значение концентрации химического агента в точке расположения конкретного человека, для конкретной метеоситуации, и определить, насколько эта величина превосходит заданный пороговый уровень.

Алгоритм решения. Оценку территориального риска (прогноз последствий) при теракте и при вероятной метеорологической ситуации PW будем осуществлять в такой последовательности [3]:

1) на *первом* этапе решения задачи формируется блок данных относительно инициирующего события (возможное место эмиссии химически опасного вещества, интенсивность эмиссии, режим эмиссии, вид химического агента);

2) на *втором* этапе формируется блок данных относительно вероятных метеоситуаций PW_i , характерных для области, где находится атакуемый объект;

3) на *третьем* этапе рассчитывается уровень химического заражения для вероятных метеоситуаций (на этом этапе проводится численное интегрирование уравнений (1) и (3) для конкретной метеоситуации);

4) на *четвертом* этапе определяются зоны, где концентрация превышает пороговое значение (например, смертельную концентрацию) при конкретной метеоситуации;

5) на *пятом* этапе осуществляется построение поля риска для рассматриваемого объекта.

Данный алгоритм оценки риска реализован в разработанном коде «CHEM-RISK».

Результаты

Разработанный код был использован для решения задачи методом моделирования. На рис. 2, *a* представлена расчетная область. В этой области располагаются несколько зда-

ний. Предполагалось, что происходит теракт с эмиссией хлора. Выброс происходит между двумя зданиями. Объект атаки – фронтально расположенная зона возле последнего здания. Длительность выброса – 6 мин. Для рассматриваемого региона вероятные значения скорости ветра составляют 2 м/с (вероятность 54 %) и 5 м/с (вероятность 30 %). Стрелка на рисунке показывает направление ветра. Рассматриваются два сценария. Первый сценарий – отсутствие защиты возле объекта атаки, второй – присутствие защиты типа «трейлер», которая размещается перед объектом атаки.

На рис. 2, *a, б* показаны изолинии концентрации хлора для момента времени 190 с, при скорости ветра 5 м/с, без защиты и при защите. Из данных рисунков видно, что формируется обширная зона химического заражения, которая охватывает объект атаки.

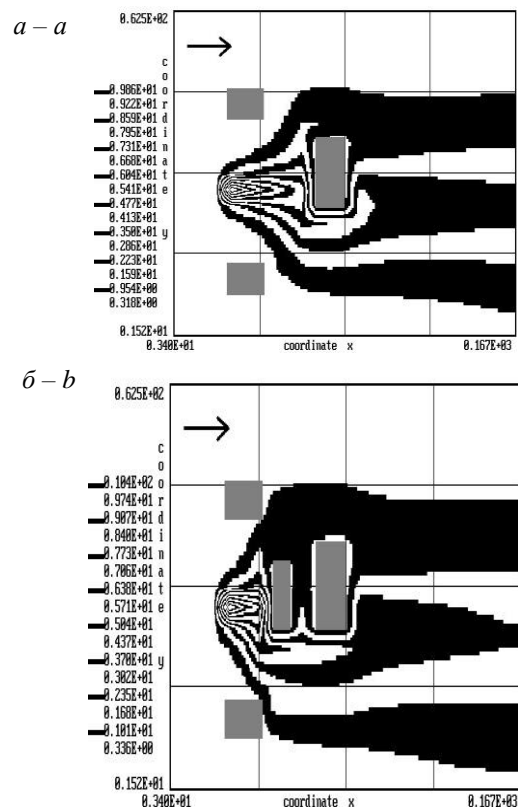


Рис. 2. Зона химического заражения при химической атаке террориста возле объекта атаки:

a – без защиты, *б* – при защите

Fig. 2. Zone of chemical contamination during a chemical attack of a terrorist:

a – no protection near the target object, *b* – with protection

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

На рис. 3, а, б представлені матриці потенціального територіального ризику в районі хімічної атаки для моменту часу 200 с, при можливих метеоситуаціях і розглядаваних сценаріях (с захистом і без захисту перед об'єктом атаки). Вероятність поразення людей вздовж будівлі показана в відсотках на кожному малюнку. Приймається, що поразення настає, якщо концентрація хлору в розрахунковій точці перевищує 3 мг/м³.

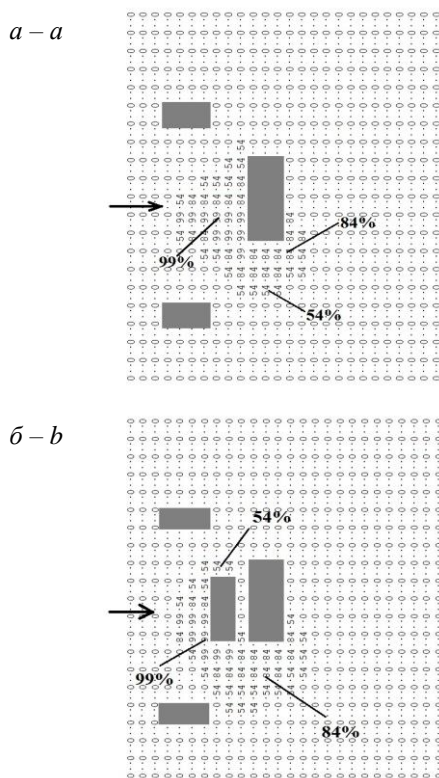


Рис. 3. Матрица территориального риска при химической атаке террориста возле объекта атаки:
а – без защиты, б – при защите

Fig. 3. Matrix of territorial risk in the chemical attack of a terrorist:
а – no protection near the target object, б – with protection

Как видно из представленных рисунков, значительному риску (до 99 %) подвергается пространство возле объекта атаки, если отсутствует защита. При наличии защиты – риск поразення людей возле объекта атаки снижается. Время расчета составляет 5 сек.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана численная модель, позволяющая оценить величину потенциального территориального риска в случае теракта с применением химического агента.

Особенностью построенной модели является использование стандартной исходной информации, быстрота в получении прогнозных данных и удобство для анализа получаемых результатов.

Выводы

В работе представлен метод оценки территориального риска при атаке террориста с применением химически опасного вещества и рассеиванием химического агента в условиях застройки. В основу метода положен численный расчет загрязнения воздушной среды в условиях застройки с последующей оценкой размеров зон поражения. Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D-модели для расчета территориального риска в случае химической атаки террориста.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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. 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.
4. 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.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

5. 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.
6. Barret, A. M. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness : Degree of Doctor of Philosophy / Anthony Michael Barret ; Carnegie Mellon University. – Pittsburg, Pennsylvania, 2009. – 123 p.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953.
8. 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: 10.1007/978-94-007-1359-8_15.
9. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations J Verlinden [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 29.01.2018.
10. Produced water treatment by ceramic membrane: A numerical investigation by computational fluid dynamics / Horteˆncia Luma Fernandes Magalhaˆes, Antonio Gilson Barbosa de Lima, Severino Rodrigues de Farias Neto, Helton Gomes Alves and Josedite Saraiva de Souza // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 1–20. doi: 10.1177/1687814016688642.
11. Regucki, P. Numerical modelling of sulphate ion concentration in wastewater from a closed cooling system / Paweł Regucki, Barbara Janowska // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 17. – P. 1–8. doi: 10.1051/e3sconf/20171700078.
12. Tashvigh, A. A. Soft computing method for modeling and optimization of air and water gap membrane distillation – a genetic programming approach / Akbar Asadi Tashvigh, Bahram Nasernejad // Desalination and Water Treatment. – 2017. – Vol. 76. – P. 30–39. doi: 10.5004/dwt.2017.20696.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, І. В. КАЛАШНІКОВ^{2*}, В. А. КОЗАЧИНА^{3*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Держ. підприємство «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», вул. Червоноармійська, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{3*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

РОЗРАХУНОК ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПІД ЧАС ТЕРАКТУ: ЕКСПРЕС МОДЕЛЬ

Мета. Робота передбачає розробку методу оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу з використанням хімічного агента. **Методика.** Для опису процесу розсіювання в атмосфері хімічного агента, викинутого у випадку теракту, використовується рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі. Рівняння враховує швидкість вітрового потоку, атмосферну дифузю, інтенсивність емісії хімічного агента, наявність будівель біля місця викиду хімічно небезпечної речовини. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння використовується кінцево-різницеви метод. Особливістю розробленої чисельної моделі є можливість оцінки територіального ризику в разі теракту при різних метеоумовах та наявності будівель. **Результати.** Розроблено спеціалізовану чисельну модель та пакет програм, який може бути використаний для оцінки територіального ризику як у випадку терактів із застосуванням хімічних агентів, так і в разі екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті. Метод може бути реалізований на комп'ютерах малої та середньої потужності, що дозволяє широко використовувати його для вирішення задач даного класу. Представлені результати обчислювального експерименту, що дозволяють оцінити можливості запропонованого методу оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу з використанням хімічного агента. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективний метод оцінки територіального ризику в разі теракту зі застосуванням хімічно небезпечної речовини. Метод може бути використаний для оцінки територіального ризику в умовах міської забудови, що дозволяє отримувати адекватні дані про можливі зони ураження. Метод засно-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ваний на чисельному інтегруванні фундаментального рівняння масопереносу, що виражає закон збереження маси в рідкому середовищі. **Практична значимість.** Запропонований метод оцінки територіального ризику в разі терористичного нападу зі застосуванням хімічного агента може бути використаний для розрахунку зон ураження біля адміністративних будівель, центрів та інших соціально значущих об'єктів.

Ключові слова: територіальний ризик; теракт; хімічне забруднення; чисельне моделювання; забруднення повітряного середовища

M. M. BILIAIEV^{1*}, I. V. KALASHNIKOV^{2*}, V. A. KOZACHYNA^{3*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznichproekt», Str. Red Army, 7, Kharkov, 61052, тел. +38 (057) 724-41-25, e-mail: uzp38@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2814-380X

^{3*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

TERRITORIAL RISK ASSESMENT AFTER TERRORIST ACT: EXPRESS MODEL

Purpose. The paper involves the development of a method to assess the territorial risk in the event of a terrorist attack using a chemical agent. **Methodology.** To describe the process of chemical agent scattering in the atmosphere, ejected in the event of a terrorist attack, the equation of mass transfer of an impurity in atmospheric air is used. The equation takes into account the velocity of the wind flow, atmospheric diffusion, the intensity of chemical agent emission, the presence of buildings near the site of the emission of a chemically hazardous substance. For numerical integration of the modeling equation, a finite difference method is used. A feature of the developed numerical model is the possibility of assessing the territorial risk in the event of a terrorist attack under different weather conditions and the presence of buildings. **Findings.** A specialized numerical model and software package has been developed that can be used to assess the territorial risk, both in the case of terrorist attacks, with the use of chemical agents, and in case of extreme situations at chemically hazardous facilities and transport. The method can be implemented on small and medium-sized computers, which allows it to be widely used for solving the problems of the class under consideration. The results of a computational experiment are presented that allow estimating possibilities of the proposed method for assessing the territorial risk in the event of a terrorist attack using a chemical agent. **Originality.** An effective method of assessing the territorial risk in the event of a terrorist attack using a chemically hazardous substance is proposed. The method can be used to assess the territorial risk in an urban environment, which allows you to obtain adequate data on possible damage areas. The method is based on the numerical integration of the fundamental mass transfer equation, which expresses the law of conservation of mass in a liquid medium. **Practical value.** The proposed method for assessing the territorial risk in the event of a terrorist attack using a chemical agent can be used to calculate the affected areas near administrative buildings, centers and other socially significant facilities.

Keywords: territorial risk; terrorist act; chemical pollution; numerical modelling; air pollution

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. Yu., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian).
3. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Yu., Kirichenko, P. S., & Muntian, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoy Rog: Kozlov R. A. (in Russian).
4. 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).
5. 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).

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

6. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Dissertation) Pittsburg, Pennsylvania, USA. (In English)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport progress*, 1(61), 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953. (In English)
8. 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*. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15. (In English)
9. *Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations J Verlinden*. (undated). Retrived from: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Cefic%20guidance%20on%20risk%20assessment.pdf>. (In English)
10. Horteˆncia Luma Fernandes Magalhaˆes, Antonio Gilson Barbosa de Lima1, Severino Rodrigues de Farias Neto, Helton Gomes Alves, & Josedite Saraiva de Souza. (2017). Produced water treatment by ceramic membrane: A numerical investigation by computational fluid dynamics. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(3), 1-20. doi: 10.1177/1687814016688642. (in English)
11. Regucki, P., & Janowska, B. (2017) Numerical modelling of sulphate ion concentration in wastewater from a closed cooling system. *E3S Web of Conferences*, 17, 1-8. doi: 10.1051/e3sconf/20171700078. (in English)
12. Tashvigh, A. A., & Nasernejad, B. (2017) Soft computing method for modeling and optimization of air and water gap membrane distillation – a genetic programming approach. *Desalination and Water Treatment*, 76, 30-39. doi:10.5004/dwt.2017. (In English)

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

Поступила в редколлегию: 22.09.2017

Принята к печати: 10.01.2018

UDC 628.315.23:519.6

M. M. BILIAIEV^{1*}, M. V. LEMESH^{2*}^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882^{2*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040**MODELING OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT ON THE BASIS OF QUICK-COMPUTING NUMERICAL MODEL**

Purpose. The scientific paper involves the development of quick computing numerical model for prediction of output parameters of aeration tank. The numerical model may be used in predicting the effectiveness of aeration tank under different regimes of work. **Methodology.** To simulate the process of biological wastewater treatment in aeration tank numerical models were developed. The flow field in the aeration tank is simulated on the basis of potential flow model. 2-D transport equations are used to simulate substrate and sludge dispersion in the aeration tank. To simulate the process of biological treatment simplified model. For the numerical integration of transport equations implicit difference scheme was used. The difference scheme is built for splitting transport equations. Splitting of transport equation into two equations is carried out at differential level. The first equation of splitting takes into account the sludge or substrate movement along trajectories. The second splitting equation takes into account the diffusive process of substrate or sludge. To solve the splitting equations implicit difference scheme was used. For the numerical integration of potential flow equation the implicit scheme of conditional approximation was used. On the basis of constructed numerical model computer experiment was performed to investigate the process of biological treatment in aeration tank. **Findings.** Quick computing numerical model to simulate the process of biological treatment in the aeration tank was developed. The model can be used to obtain aeration tank parameters under different regimes of work. The developed model takes into account the geometrical form of the aeration tank. **Originality.** The numerical model which takes into account the geometrical form of aeration tank and fluid dynamics process was developed; the model takes into account substrate and sludge transport in aeration tank and process of biological treatment. **Practical value.** Efficient numerical model, so called «diagnostic models» was proposed for quick calculation of biological treatment process in aeration tank.

Keywords: biological treatment; numerical simulation; aeration tank

Introduction

Aeration tanks (AT) are widely used in practice for biological wastewater treatment at treatment plants. AT are used for industrial or municipal wastewaters treatment and may work under different regimes. There are different types of AT but in practice so called «vitesnitel» AT (AT of displacement type) is often used: In this AT influent (waste waters) and sludge, which is used for biological treatment, are supplied at one side of the AT (inlet boundary) and are discharged at the opposite side (outlet boundary) (Fig.1).

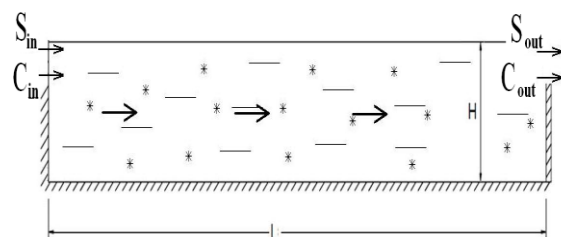


Fig. 1. Aeration tank «vitesnitel»
(AT of displacement type)

Literature review

Mathematical models which are used for aeration tank calculation can be separated in some classes. First of all we have to mention empirical models which were built on the basis of physical experiments [5, 7]. These models have the form of

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

simple algebraic formulae with some empirical coefficients. These models are widely used in Ukraine but for calculation of typical AT and for the typical regimes of work for which the empirical constants were obtained. We can't use these models for scientific research, for example, to predict the output parameters after treatment in the case which is out of the normal work of aeration tank.

The second class of the models includes mass balance models. These models can be named «zero-dimensional» models. The balance models are very popular [3, 4, 8, 17] and take into account some important parameters of aeration tank work. These models are based on the ordinary differential equations which represent mass balance of sludge, admixture or oxygen in aeration tank. These differential equations can be solved analytically or numerically (for example using Runge – Kutta method). Some commercial codes can be used to perform calculations on the basis of these models. These models are very convenient for prediction of aeration tank output parameters but the models do not take into account the fluid dynamics process in AT.

The models of the third class are based on «one-dimensional» equations of mass transport to simulate, for example, substrate dispersion in AT [6, 9]. The modeling equations are solved analytically. Fluid dynamics is taken into account in these models but for the case of constant velocity in AT.

CFD models are the most «powerful» models at present time to solve the problems of wastewater treatment [1, 2, 10, 12-15]. These models can reproduce the flow field in the AT and admixture transfer for different regimes of work with account of AT geometrical form. As a rule the CFD experiments are performed using commercial codes (for example, ANSYS, Fluent) [11, 12, 16, 17]. CFD experiments comprise of two steps. The first step is computation of flow field. Very often this flow field is computed using of Navier – Stokes equations. The second step is simulation of admixture transfer on the basis of computed flow field. Application of Navier-Stokes equations needs much computing time (to solve some problems it may take from 90h to some weeks to perform CFD experiment). It is not convenient in case of many calculations during AT design or at stage of AT re-engineering.

Purpose

The purpose of this work is the development of quick-computing numerical model to simulate the process of biological wastewater treatment in «vitesnitel» aeration tank (aeration tank of displacement type).

Mathematical model

To simulate the process of biological treatment in AT, at each time step of mathematical simulation, we separate the process in two stages. At first stage we consider the process of substrate and sludge movement in the aeration tank. It is so called «mass transfer» process. To simulate this process we use the following 2-D transport equations (plan model) [7, 12]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} C), \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} S), \quad (2)$$

where $C(x, y) = \frac{1}{H} \int_0^H C(x, y, z) dz$ – is the averaged concentration of substrate; H – is the depth of the aeration tank (Fig.1);

$S(x, y) = \frac{1}{H} \int_0^H S(x, y, z) dz$ – is the averaged concentration of sludge for biological treatment; u, v – are the flow velocity components in x, y direction respectively; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – are the coefficients of turbulent diffusion in x, y direction respectively; t – is time.

The boundary conditions for these equations are as following:

1. at the inlet opening the boundary condition is

$$C = C_{in}, S = S_{in}, \quad (3)$$

where C_{in}, S_{in} are known concentrations of substrate and sludge respectively.

2. at the outlet opening the boundary condition in the numerical model (Fig.2) is written as follows

$$\begin{aligned} C(i+1, j) &= C(i, j), \\ S(i+1, j) &= S(i, j), \end{aligned} \quad (4)$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

where $C(i+1, j), S(i+1, j)$ are concentrations at the last computational cell; $C(i, j), S(i, j)$ are concentrations at the previous computational cell.

Boundary condition (4) means that we neglect the diffusion process at the outlet boundary.

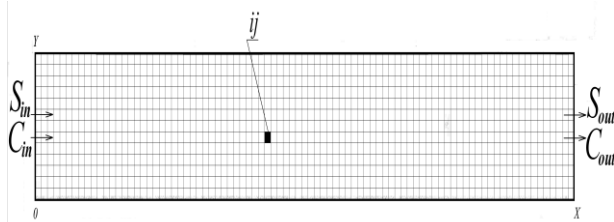


Fig. 2. Sketch of computational domain

3. at the solid walls the boundary condition is

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0, \frac{\partial S}{\partial n} = 0,$$

where n is normal vector to the boundary.

The initial condition, for $t = 0$, is

$$C = C_0, S = S_0,$$

where C_0, S_0 are known concentrations of substrate and sludge respectively in computational domain.

At the second stage of mathematical simulation we consider the biological process in the aeration tank. To simulate this process in each computational cell inside the aeration tank we use the following simplified model

$$\frac{dC(t)}{dt} = -\frac{\mu(t)}{Y} S(t), \quad (5)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \mu(t) S(t), \quad (6)$$

where μ is biomass growth rate; Y is biomass yield factor.

To calculate biomass growth rate Monod law is used.

As the initial condition for each equation (5), (6), at each time step, we use the meaning of C, S obtained after computing Eq. 1, 2.

To solve Eq. 1, 2 it is necessary to know the flow field in aeration tank. To simulate this flow field we use model of potential flow. In this case the governing equation is

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (7)$$

where P is the potential of velocity.

The velocity components are calculated as follows:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (8)$$

Boundary conditions for equation (7) are [5]:

1. At the inlet boundary $\frac{\partial P}{\partial n} = V$, where V is known velocity.
2. At the outlet boundary $P = \text{const.}$
3. At the solid boundaries $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$.

Numerical model

To perform numerical integration of governing equations rectangular grid was used. Concentration of substrate, sludge and P were determined in the centers of computational cells. Velocity components u, v were determined at the sides of computational cells.

To solve equation (7) we used the difference scheme of «conditional approximation». To use this scheme we wrote Eq. 5 in «unsteady» form

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (9)$$

where t is «fictitious» time.

It's known that for t solution of Eq. 9 tends to the solution of Eq. 7.

We split the process of Eq. 9 in two steps and difference equations at each step are as follows [4]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right], \quad (10)$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (11)$$

The calculation on the basis of these formulas is complete if the following condition is fulfilled:

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

where ε is a small number; n is iteration number.

Difference scheme of splitting (10), (11) is implicit but unknown value of P is calculated, at each step of splitting, using explicit formula of «*running calculation*». That is very convenient for programming the difference formulae.

To solve Eq. 9 it is necessary to set initial condition for fictitious time $t = 0$. The initial condition is

$$P = P_0,$$

where P_0 is known value of potential in computational domain.

If we know field of P in computational domain we can compute velocity components at the side of computational cells

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad (12)$$

$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (13)$$

Main features of the implicit difference scheme to solve numerically Eq. 1, 2 we consider only for equation of substrate transport because Eq. 1 and 2 are similar from mathematical point of view. Before numerical integration we split transport equation in two equations. The scheme of splitting is as follows

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial y} \right). \quad (15)$$

From the physical point of view, equation (14) takes into account substrate movement along trajectories, equation (15) takes into account the process of substrate diffusion in aeration tank. After that splitting the approximation of equation (12) is carried out. Time dependent derivative is approximated as follows:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

The convective derivatives are represented as:

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

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

$$\text{where } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}, \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2},$$

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

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

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

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

At the next step we write the finite difference scheme of splitting:

– at the first step $k=1/2$:

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) = 0; \quad (16)$$

– at the second step $k=1$, $c=n+1/2$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) = 0. \quad (17)$$

This difference scheme is implicit and absolutely steady but unknown concentration C is calculated using the explicit formulae at each step («method of running calculation»).

Further, Eq. (15) is numerically integrated using implicit difference scheme (10), (11). To solve Eq. 3, 4 we used Eurler method. On the basis of developed numerical model code «*BIOTreat*» was developed. FORTRAN language was used to code the solution of difference equations.

Description of computational procedure

Numerical solution of the whole problem is as follows:

- **Step 1:** we compute potential P in aeration tank (Eq. 8, 9)
- **Step 2:** we compute velocity components (Eq. 10, 11)
- **Step 3:** we compute biological process in aeration tank (Eq. 3, 4)
- **Step 4:** we compute substrate and sludge

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

transport in aeration tank (governing equations 1, 3; numerical equations 14, 15 (for C and S) and Eq. 8, 9 written for C and S)

– **Step 5:** for the next time level t , the computational procedure repeats from step 3.

Case Study. Developed code «BIOTrea» was used to solve the following model problem. The aeration tank is filled with sludge (concentration $S_0=2$) and substrate (concentration $C_0=100$) at time $t=0$. All parameters of the problem are dimensionless. During time period from $t=0$ till $t=2$ the inlet and outlet openings are closed and no flow in the aeration tank. It means that for this time period only biological treatment takes place and we solve only Eq. 3, 4 of the model. At time $t=2$ the inlet and outlet openings are open and the transport process starts. At the inlet opening the substrate concentration is equal to $C_0=100$ and sludge concentration is equal to $S_0=2$. Also at this time five sources of sludge supply inside the aeration tank starts to work with intensity Q_i . Position of these sources can be seen in Fig. 4 where the influence of these sources results in local ‘deformation’ of concentration field. This field has practically small concentration gradient in aeration tank everywhere except points where sources of sludge supply are situated.

In Fig. 3 we present sludge and substrate concentration change near the outlet opening of the aeration tank (point A in Fig.4). From Fig. 3 we can see that the process of biological treatment accelerates from $t=2$ and concentration of sludge at the outlet opening increases with time.

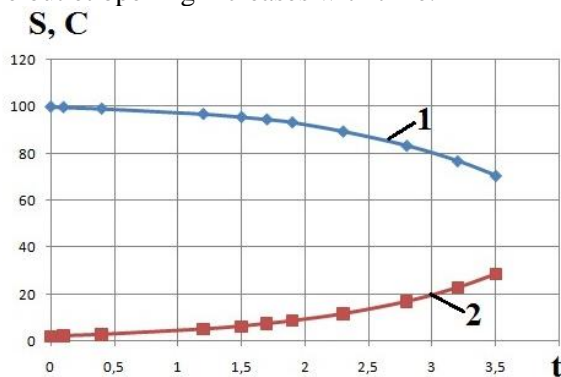


Fig. 3. Sludge and substrate concentration change near the outlet opening:

1 – substrate concentration; 2 – sludge concentration

In Fig. 4 the concentration field of sludge for time step $t=4$ is shown. It is well seen the zones of sludge sources influences. These zones have form of circles.

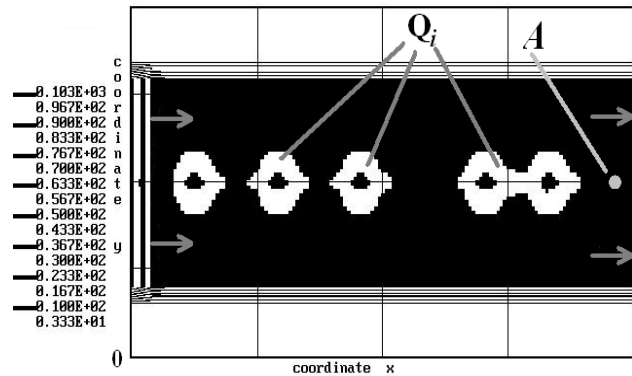


Fig. 4. Field of sludge concentration inside the aeration tank, $t=4$:

1 – position of sludge supply sources

Findings

Quick computing numerical model was developed to simulate the wastewater treatment in aeration tank. The model does not take much time because the fluid dynamics process is simulated on the basis of potential flow model.

Originality and practical value

A new numerical model to predict the output parameters of aeration tank was developed. The model is based on the 2-D transport equations of substrate and sludge and simplified equations of biological treatment. The developed model takes into account geometrical form of aeration tank. The model can be useful in aeration tanks design.

Conclusions

The article contains results of numerical model development for wastewater treatment in «vitesnitel» aeration tank (aeration tank of displacement type). To simulate the process of biological treatment 2-D transport equations of substrate and sludge are used together with simplified models of biological treatment. The future work in this field will be connected with development of fluid dynamics model which takes into account oxygen transfer in the aeration tank.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках / Н. Н. Беляев, В. А. Козачина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. – 115 с.
2. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная. – Днепропетровск : Новая идеология, 2012. – 112 с.
3. Горносталь, С. А. Исследование зависимости концентрации загрязнений в очищенной воде на выходе из аэротенка в процессе биологической очистки / С. А. Горносталь, Ю. В. Уваров // Проблемы надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. – Харків, 2011. – Вип. 14. – С. 65–69.
4. Козачек, А. В. Исследование математической модели процесса аэробной очистки сточных вод как стадия оценки качества окружающей водной среды / А. В. Козачек, И. М. Авдашин, В. А. Лузгачев // Вестн. Тамбов. техн. ун-та. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, вып. 5. – С. 1683–1685.
5. Колобанов, С. К. Проектирование очистных сооружений канализации / С. К. Колобанов, А. В. Ершов, М. Е. Кигель. – Киев : Будівельник, 1997. – 224 с.
6. 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 // Доп. нац. акад. наук України. – 2015. – № 5. – С. 55–60. doi: 10.15407/dopovidi2015.05.055.
7. Очистка производственных сточных вод в аэротенках / Я. А. Карелин, Д. Д. Жуков, В. Н. Журов, Б. Н. Репин. – Москва : Стройиздат, 1973. – 223 с.
8. Святенко, А. І. Важливість урахування особливостей біологічного очищення в аэротенках для поліпшення показників їх роботи / А. І. Святенко, Л. М. Корнієнко // Екологічна безпека. – 2009. – № 4 (8). – С. 93–96.
9. Теоретический анализ процессов осаждения в системах биологической очистки сточных вод / А. Я. Олейник, Ю. И. Калугин, Н. Г. Степовая, С. М. Зябликов // Прикладна гідромеханіка. – 2004. – Т. 6 (78), № 4. – С. 62–67.
10. Biliaiev, M. M. Numerical determination of horizontal settlers performance / M. M. Biliaiev, V. A. Kozachyna // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – P. 34–43. doi: 10.15802/STP2015/49201.
11. Foat, T. G. Investigating a selection of mixing times for transient pollutants in mechanically ventilated, isothermal rooms using automated computational fluid dynamics analysis / T. G. Foat, J. Nally, S. T. Parker // Building and Environment. – 2017. – Vol. 118. – P. 313–322. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.011.
12. Hadad, H. Numerical Simulation of the Flow Pattern in the Aeration Tank of Sewage Treatment System by the Activated Sludge Process Using Fluent Program / H. Hadad, J. Ghaderi // Biological Forum. – 2015. – Vol. 7 (1). – P. 382–393.
13. Ilie, M. Modeling and simulation of Organic Matter Biodegradation Processes in Aeration Tanks with Activated Sludge / M. Ilie, D. N. Robescu, G. Chita // Revista de chimie (Bucuresti-România). – 2009. – Vol. 60, No. 5. – P. 529–532.
14. Kozachyna, V. A. Investigation of admixture sedimentation in the horizontal settler / V. A. Kozachyna // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – P. 7–14. doi: 10.15802/stp2016/77827.
15. Mocanu, C. R. Numerical simulations of wastewater treatment aeration processes / C. R. Mocanu, R. Mihailescu // U.P.B. Scientific Bulletin. Series D. – 2012. – Vol. 74. – Iss. 2. – P. 191–198.
16. Modeling based decision for smart city environmental alert system for accidental air pollution / Sahar Masmoudi, Amjad Kallel, Dalila Taieb, Abdenaceur Kachouri // 2017 Intern. Conf. on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C) : Conf. Paper (February, 17–19, 2017). – Kerkennah, Tunisia, 2017. – P. 96–100. doi: 10.1109/SM2C.2017.8071826.
17. Ranking surface soil pollution potential of chemicals from accidental release by using two indicators calculated with a multimedia model (SoilPCA) / Ki-Eun Kim, Ja Eun Jung, Yunah Lee, Dong Soo Lee // Ecological Indicators. – 2018. – Vol. 85. – P. 664–673. doi: 10.1016/j.ecolind.2017.11.010.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, М. В. ЛЕМЕШ^{2*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

МОДЕЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД НА ОСНОВІ ШВИДКОДІЮЧОЇ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ

Мета. Наукова робота передбачає розробку швидкодіючої чисельної моделі для прогнозування вихідних параметрів аеротенка. Чисельну модель можна використовувати для прогнозування ефективності аеротенка при різних режимах роботи. **Методика.** Для моделювання процесу біологічної очистки стічних вод в аеротенках були розроблені чисельні моделі. Поле потоку в аеротенку відтворюється на основі моделі потенційної течії. 2-D рівняння масопереносу використовуються для моделювання розсіювання субстрату і мулу. Для моделювання процесу біологічної обробки застосовується спрощена модель. Для чисельного інтегрування рівнянь переносу вживалася неявна різницева схема. Різницева схема побудована для розщеплення рівнянь переносу. Розщеплення рівняння переносу здійснюється на два рівняння та виконується на диференціальному рівні. Перше рівняння розщеплення враховує рух мулу або субстрату по траєкторіях, а друге – дифузний процес перенесення домішки і мулу. Для вирішення рівнянь розщеплення використовувалася неявна різницева схема. Для чисельного інтегрування рівняння потенційної течії застосовувалася неявна схема умовного наближення. На основі побудованої чисельної моделі був виконаний комп'ютерний експеримент для дослідження процесу біологічної очистки в аеротенку. **Результати.** Розроблена чисельна модель дозволяє швидко моделювати процес біологічної очистки в аеротенку. Модель може використовуватися для оцінки ефективності роботи аеротенків при різних режимах роботи. Розроблена модель враховує геометричну форму аеротенка. **Наукова новизна.** Розроблено чисельну модель, що враховує геометричну форму аеротенка та процес динаміки рідини, а також процес руху субстрату і мулу в аеротенку. **Практична значимість.** Запропоновано ефективну чисельну модель класу «diagnostic models» для швидкого розрахунку процесу біологічної очистки в аеротенку.

Ключові слова: біологічна очистка; чисельне моделювання, аеротенк

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, М. В. ЛЕМЕШ^{2*}

^{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. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Цель. Научная работа предполагает разработку быстродействующей численной модели для прогнозирования выходных параметров аэротенка. Численную модель можно использовать для прогнозирования эффективности аэротенка при различных режимах работы. **Методика.** Для моделирования процесса биологической очистки сточных вод в аэротенке были разработаны численные модели. Поле потока в аэротенке воспроизводится на основе модели потенциального течения. 2-D уравнения массопереноса используются для моделирования рассеивания субстрата и ила. Для моделирования процесса биологической очистки используется упрощенная модель. Для численного интегрирования уравнений переноса применялась неявная разностная схема. Разностная схема построена для расщепления уравнений переноса. Расщепление уравнения переноса осуществляется на два уравнения и выполняется на дифференциальном уровне. Первое уравнение расщепления учитывает движение ила или субстрата по траекториям, а второе – диффузионный про-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

цесс переноса примеси и ила. Для решения уравнений расщепления использовалась неявная разностная схема. Для численного интегрирования уравнения потенциального течения применялась неявная схема условного приближения. На основе построенной численной модели был выполнен компьютерный эксперимент для исследования процесса биологической очистки в аэротенке. **Результаты.** Разработанная быстродействующая численная модель позволяет быстро моделировать процесс биологической очистки в аэротенке. Модель может использоваться для оценки эффективности работы аэротенка при разных режимах работы. Разработанная модель учитывает геометрическую форму аэротенка. **Научная новизна.** Разработана численная модель, учитывающая геометрическую форму аэротенка и процесс динамики жидкости; а также процесс движения субстрата и ила в аэротенке и процесс биологической очистки. **Практическая значимость.** Предложена эффективная численная модель класса «diagnostic models» для быстрого расчета процесса биологической очистки в аэротенке.

Ключевые слова: биологическая очистка; численное моделирование; аэротенк

REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (In Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (In Russian)
3. Gornostal, S. A., & Uvarov, Yu. V. (2011). Issledovanie zavisimosti kontsentratsii zagryazneniy v ochishchennoy vode na vykhode iz aerotenko v protsesse biologicheskoy ochistki. *Problemy nadzvychaynykh situatsii: zbirnyk naukovykh prats*, 14, 65-69. (In Russian)
4. Kozachek, A. V., Avdashin, I. M., & Luzgachev, V. A. (2014). Issledovanie matematicheskoy modeli protsessa aerobnoy ochistki stochnykh vod kak stadiya otsenki kachestva okruzhayushchey vodnoy sredy. *Vestnik Tambovskogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Yestestvennye i tekhnicheskie nauki*, 19(5), 1683–1685. (In Russian)
5. Kolobanov, S. K., Yershov, A. V., & Kigel, M. Ye. (1997). *Proektirovanie ochistnykh sooruzheniy kanalizatsii*. Kiev: Budivelnik. (In Russian)
6. Oliinyk, O. Ya., & 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. *Dopovidi natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, 5, 55-60. doi: 10.15407/dopovidi2015.05.055 (In Ukrainian)
7. Karelin, Ya. A., Zhukov, D. D., Zhurov, V. N., & Repin, B. N. (1973). *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkakh*. Moscow: Stroyizdat. (In Russian)
8. Sviatenko, A. I., & Kornienko, L. M. (2009). Vazhlyvist urakhuvannia osoblyvostei biolohichnoho ochyshchennia v aerotenkakh dlia polipshennia pokaznykiv yikh roboty. *Ekolohichna bezpeka*, 4(8), 93–96. (In Ukrainian)
9. Oleynik, Ya. A., Kalugin, Yu. I., Stepovaya, N. G., & Zyablikov, S. M. (2004). Teoreticheskii analiz protsessov osazhdeniya v sistemakh biologicheskoy ochistki stochnykh vod. *Prikladna gidromekhanika*, 6(78), 4, 62-67. (In Russian)
10. Biliaiev, M. M., & Kozachyna, V. A. (2015). Numerical determination of horizontal settlers performance. *Science and Transport Progress*, 4(58), 34-43. doi: 10.15802/STP2015/49201. (In English)
11. Foat, T. G., Nally, J., & Parker, S. T. (2017). Investigating a selection of mixing times for transient pollutants in mechanically ventilated, isothermal rooms using automated computational fluid dynamics analysis. *Building and Environment*, 118, 313-322. doi: dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.011. (In English)
12. Hadad, H., & Ghaderi, J. (2015). Numerical Simulation of the Flow Pattern in the Aeration Tank of Sewage Treatment System by the Activated Sludge Process Using Fluent Program. *Biological Forum*, 7(1), 382-393. (In English)
13. Ilie, M., Robescu, D. N., & Chita, G. (2009). Modeling and simulation of Organic Matter Biodegradation Processes in Aeration Tanks with Activated Sludge. *Revista de chimie (Bucuresti-România)*, 60(5), 529-532. (In English)
14. Kozachyna, V. A. (2016). Investigation of admixture sedimentation in the horizontal settler. *Science and Transport Progress*, 4(64), 7-14. doi: 10.15802/stp2016/77827. (In English)
15. Mocanu, C. R., & Mihailescu, R. (2012). Numerical simulations of wastewater treatment aeration processes. *U.P.B. Scientific Bulletin, Series D*, 74(2), 191-198. (In English)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

16. Masmoudi, S., Kallel, A., Taieb, D., & Kachouri, A. (2017). Modeling based decision for smart city environmental alert system for accidental air pollution. *International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C), Kerkennah, Tunisia, February, 17-19*, 96-100, doi: 10.1109/SM2C.2017.8071826. (In English)
17. Ki-Eun Kim, Ja Eun Jung, Yunah Lee, & Dong Soo Lee (2018). Ranking surface soil pollution potential of chemicals from accidental release by using two indicators calculated with a multimedia model (SoilPCA). *Ecological Indicators*, 85, 664-673. doi: //doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.010. (In English)

Prof. S. A. Pichuhov, Dr. Sc. (Phys.-Math.) (Ukraine) recommended this article to be published

Received: Oct. 04, 2017

Accessed: Jan. 05, 2017

UDC 628.16

S. M. EPOYAN^{1*}, V. A. YARKIN², G. I. SUKHORUKOV³, S. P. BABENKO⁴^{1*}Dep. «Water Supply, Sewerage and Hydraulics», Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Sumska St., 40, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 700 38 34, e-mail vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0003-4551-1309²Dep. «Water Supply, Sewerage and Hydraulics», Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Sumska St., 40, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 700 38 34, e-mail vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0001-7844-6772³Dep. «Water Supply, Sewerage and Hydraulics», Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Sumska St., 40, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 700 38 34, e-mail vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0002-1740-3098⁴Dep. «Water Supply, Sewerage and Hydraulics», Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Sumska St., 40, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 700 38 34, e-mail vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0001-7918-1737**CORRIDOR-TYPE BAFFLED MIXING BASIN WITH CROSS POROUS BARRIERS**

Purpose. The paper highlights the increase in operational efficiency of corridor-type baffled mixing basin by installing of cross porous barriers made of gravel (or other materials) and epoxy resin, grade ED-20 (ED-16) with the hardener polyethylenepolyamine (PEPA), approved by Ukrainian Ministry of Health in systems of utility and drinking water supply. **Methodology.** The first stage of the experiments was performed on the model of the proposed mixer in scale 1:4 in order to determine the local resistance of the porous barrier, which is made of gravel with a size of 10-15 mm (average diameter 12.5 mm) and thickness of 50 mm. The local resistance of the barrier was measured using piezometers installed before and after the porous barrier. The velocity of water motion in the corridor of the mixer was determined depending on the water consumption, incoming on the mixer accordingly to the water meter and by the volumetric method. **Findings.** In accordance with researches when the water flows at a velocity of 0.1 m/s in the corridor of the mixer, the head losses in the porous barrier is 17 cm (0.17 m), and at a velocity of 0.2 m/s—0.68 m. The resistance coefficient (ξ), which is equal to 333.2 for the investigated barrier, was determined experimentally. It allows determining the head losses in the porous barrier at other velocities of water motion. When the velocity of water motion in the corridors of the mixer is from 0.7 up to 0.5 m/s, head losses increase almost fourfold. The conducted researches allowed to develop a calculation methodology for corridor-type baffled mixing basin with porous polymer-concrete barriers. **Originality.** Authors developed and investigated the corridor-type baffled mixing basin with porous polymer-concrete barriers. These barriers allow increasing and regulating the intensity and time of reagents mixing with the initial water exactly in the barriers, improving the distribution of the flow through the section of the mixer corridors. **Practical value.** The location of removable porous barriers in the corridors of the baffled mixing basin makes it possible to increase the efficiency of its operation and improve the quality of the treated water.

Keywords: baffled mixing basin; cross barriers; porous polymer-concrete; intensity of mixing; increase in operational efficiency

Introduction

One of the main users of drinking water are railways, therefore efficiency improvement of natural water purification is an urgent problem.

Coagulation is a powerful tool of intensifying the main process of natural waters purification, the successful completion of which results in the quality of the treated water supplied to the consumer [4-6, 14, 20].

Intensification of the coagulation process is of great importance in connection with the increasing requirements for the quality of drinking water.

Through a rational process: the right choice of coagulants, flocculants, places and conditions for their introduction into water under purification, it

is possible in many cases to increase the productivity of structures, to make a cheaper process and improve the quality of water purification [1, 10, 12, 13, 18].

In all cases, with the use of any coagulants, the conditions for mixing the reagent with water and the conditions for the flocculation are crucial for the further process of water clarification.

According to researchers, conducting the processes of mixing water with the coagulant and flocculation in optimal conditions leads to significant savings of the coagulant (up to 30%), reduces the time of water presence in sediment basins due to the formation of quick-settling flocs, reduces the load on the filters on contamination (up

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

to 50%), increases the filter cycle and improves the quality of water purification [3, 7, 9, 17, 19].

In most cases, when the coagulants are injected into the water, physical and chemical reactions occur, the ending of which until the time of full mixing of the reagent with water can lead to a violation of optimal coagulation conditions or to the excess coagulant. Thus, it is necessary to provide such a mode of operation of the mixers, so that the coagulant comes in contact with the maximum number of particles of contamination before the end of the of hydrolysis-polymerization reaction.

Purpose

The purpose of the study is increase in operational efficiency of corridor-type baffled mixing basin by installing of cross porous barriers made of gravel (or other materials) and epoxy resin, grade ED-20 (ED-16) with the hardener polyethylene-polyamine (PEPA), approved by Ukrainian Ministry of Health in systems of utility and drinking water supply. The first stage of the research: the experiments to determine the local resistance of the porous barrier.

On the basis of the conducted researches to develop a calculation method for corridor-type baffled mixing basin with porous polymer-concrete barriers.

Methodology

In solving the problems associated with water purification, the case of disperse systems coagulation dispersed in a moving fluid is considered. Disperse particles undergo Brownian motion, the intensity of which depends on the size of particles. In the process of aggregation caused by the Brownian motion, the colloidal particles reach the size at which the effect of the Brownian motion is stopped. If the further contact between the particles is not provided by mixing the water, coagulation is stopped. Sometimes this further contact is provided by the settling of the largest particles, which, while their moving downward capture smaller particles. The first phase of coagulation described above is called perikinetic one. Increasing the efficiency of perikinetic coagulation is achieved by reducing the stability of colloidal particles. Therefore, the phase of perikinetic coagulation stipulates the choice of type

and dose of coagulant. The phase of perikinetic coagulation ends when the particles reach a size of 1-10 microns. The phase of perikinetic coagulation coincides with the period of "rapid" mixing of coagulant with water, which significantly effects the efficiency of coagulating water purification.

Until recently, it was believed that the purpose of the mixers was to evenly distribute the coagulant in the water under purification. In domestic practice it is generally accepted that mixing should finish before the formation of flocs in the whole mass of water.

At present it is believed that mixing the coagulant with water should be carried out extremely fast and the process taking place in the mixer is crucial for further coagulation stages.

The direction of water purification technology associated with the instantaneous distribution of the coagulant in water is based on the coagulation theory, according to which the role of intermediate dissolved aluminum complexes in the destabilization of suspended particles is very great. At the same time, the required mixing velocity of the coagulant with water is dependent on the rate of formation of compounds capable to destabilize contaminant particles. Ineffective mixing can lead to the excess coagulant and a small rate of aggregation of particles at a given dose of coagulant [5, 10, 12].

In our country the hydraulic mixers are widely used, including a corridor-type baffled mixing basin [5, 6, 10, 13]. The operation of mixers is accepted to characterize as the value of the average gradient of velocity (G), that is, the intensity of mixing. Researches of Rozhdestvyenska E. A., Mirzayev A. showed that the effectiveness of the coagulants and flocculants action increases with an increase in the intensity of mixing in comparison with the usual accepted one approximately $G = 250 \dots 300 \text{ s}^{-1}$. At the same time, the dose of reagents and the time required for their full distribution in water decreases with an increase in the velocity of the gradient [12].

The disadvantages of the corridor-type baffled mixing basin include: impossibility of regulating the intensity of mixing, the usage for mixing of only one reagent, the inadequate efficiency of its operation.

The Department of Water Supply, Sewage and Hydraulics at KHNUCA proposed and studied the

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

corridor-type baffled mixing basin with slit-type cross barriers [16].

The disadvantages of the proposed baffled mixing basin are that the slit-type barriers located in the mixer channels only change the velocity of the water, owing to the mixing intensity increases. But mixing the reagents with the initial water does not occur particularly in the slit-type barriers.

Therefore, it is proposed to increase and adjust the intensity and time of mixing the reagents with the initial water in the barriers themselves and to improve the distribution of the flow through the section of the mixer corridors.

The problem is solved due to the fact that in the channels of the barrier mixer the removable porous barriers locate perpendicular to the barriers, which are made on the basis of a bonding agent [11,15] (for example, porous polymer-concrete barriers). Porous barriers increase the intensity of mixing the reagents with the initial water due to the fact that mixing occurs not only in the volume of the mixer, but also in the porous barrier itself. Porous channels have a twisted shape that connect and separate the pore channels between themselves. The flows of the initial water and solutions of reagents that move along the pore channels collide with each other, connect and separate, which increases the intensity of mixing the reagents with

the initial water. And the even flow of the initial water, mixed with the reagent, from the pore channels of the porous barrier improves the flow distribution along the corridor cross-section in the mixer. Changing the thickness of the porous barrier allows you to adjust the time of mixing of the initial water with the reagents in the porous barrier itself. Changing the filler material of the porous barrier allows to vary its porosity (for example, the porosity of shungizite $\approx 65\%$ and volcanic slag $\approx 55\%$), which makes it possible to change the flow velocity in the pore channels of the barrier, that is, to regulate the intensity of mixing in the barrier. Changing the particles sizes of the filler of the porous barrier changes the sizes of the pore channels of the barrier. The larger the size of the filler particles, the greater the size of the pore channels, which makes it possible to match the size of the filler particles for each reagent.

Porous barriers have local resistances, so they have to be set at the beginning or at the end of the channel in which they are located, since the water level before the porous barrier is greater than after it, and the velocity of water motion in the mixer channel have to meet current standards.

The proposed construction of an advanced corridor-type baffled mixing basin with porous barriers is schematically presented in Figure 1.

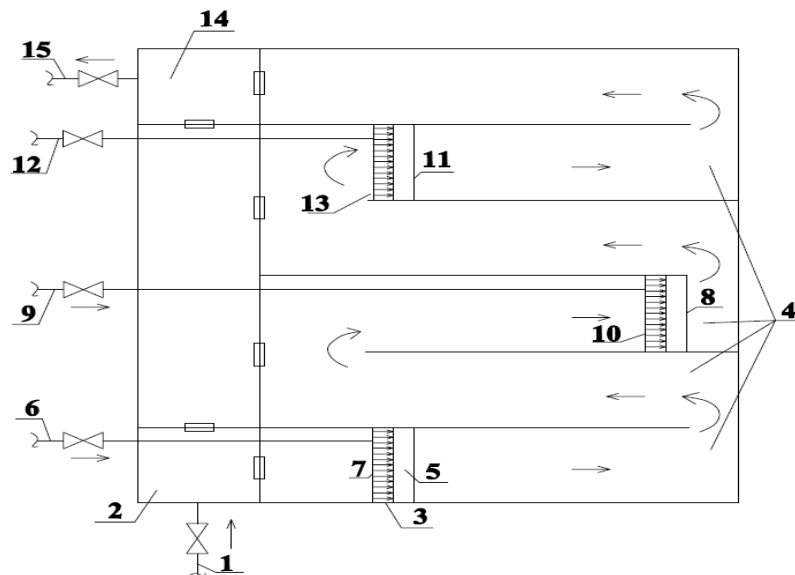


Fig. 1. Scheme of advanced corridor-type baffled mixing basin with porous barriers

The advanced baffled mixing basin consists of a pipeline of initial water supply – 1, a feed well – 2, body of an advanced baffled mixing

basin – 3, channels of advanced baffled mixing basin – 4, porous barrier – 5, with the first type of the filler material and the size of its particles, as

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

well as with the first thickness, the pipeline (hose) of the first reagent supply – 6, the dispersed tubular slit-type or perforated (holed) supply system of the first reagent (for example, chlorine reagent) – 7, porous barrier – 8, with the second type of the filler material and the size of its particles, as well as with the second thickness, the pipeline (hose) of the second reagent supply – 9, the dispersed tubular slit-type or perforated (holed) supply system of the second reagent (for example, coagulant) – 10, the porous barrier – 11, with the third type of the filler material and the size of its particles, as well as with the third thickness, the pipeline (hose) of the third reagent supply – 12, the dispersed tubular slit-type or perforated (holed) supply system of the third reagent (for example, the flocculant) – 13, the collection chamber – 14, pipeline – 15 of the initial water diversion, mixed with reagents.

The advanced corridor-type baffled mixing basin with porous barriers operates in the following manner. The initial water through the pipeline – 1 enters to the feed well – 2 and then into the body of the advanced baffled mixing basin – 3 in its first channel – 4, passing through the dispersed tubular slit-type or perforated (holed) supply system of the first reagent – 7, in which through the pipeline (hose) – 6 the first reagent is fed and the porous barrier – 5, in which it is intensively mixed with the first reagent. Further, the mixing process and the contact time of the reagent with the initial water occur in channels – 4 of the advanced baffled mixing basin. Then the initial water, which is mixed with the first reagent, enters the next channel 4 of the advanced baffled mixing basin, passes through the dispersed tubular slit-type or perforated (holed) supply system of the second reagent – 10, in which through the pipeline (hose) – 9 the second reagent is fed and a porous barrier – 8, in which it is intensively mixed with the first and second reagents. Next, the mixing process and the contact time of the reagents with the initial water occur in channels 4 of the advanced baffled mixing basin. Then the initial water, which is mixed with two reagents, enters the next channel 4 of the advanced baffled mixing basin, passes through the dispersed tubular slit-type or perforated (holed) supply system of the third reagent – 13, in which through the pipeline (hose) – 12 the third reagent is fed and the porous barrier – 11, in it it is

intensively mixed with the third and the previous reagents. Further, the water, mixed with reagents, moves to last channels 4 of the advanced baffled mixing basin, enters the collecting chamber – 14 and through the pipeline – 15 is discharged from the mixer.

To verify the proposed solution to increase the efficiency of advanced baffled mixing basin due to the installation of transverse porous barriers in the mixer corridors, experiments were carried out on the model of such a mixer.

The first stage of experiments was carried out on the model of the proposed mixer 1:4 in order to determine the local resistance of the porous barrier.

The porous barrier is made of gravel, size 10÷15 mm diameter (average diameter 12.5 mm) and epoxy resin, grade ED-20 with a polyethylenepolyamine (PEPA). This material is characterized by high strength, high chemical resistance to the aggressive effect of water treated with reagents, lack of biofouling in the course of long-term exploitation [2, 8]. The barrier has a thickness of 50 mm. The local resistance of such a barrier was measured using the piezometers installed before and after the porous barrier. The velocity of water motion in the mixer corridor was determined depending on the duty of water supplied to the mixer, by the water meter and the volume method.

As it known, any local resistance can be determined by the formula [12]:

$$h = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (1)$$

where ξ – coefficient of resistance; v – velocity of water motion in the mixer; g – free fall acceleration, equal to 9.8 m/s².

In this case, there is a question: how to define the velocity of motion (v) if a porous barrier is installed. In other words, how to define the velocity of water motion exactly in the porous barrier. It can be realized, if we determine the porosity of this barrier (using the Archimedean method), and then recalculate the velocity of water motion exactly in the barrier pores. In our opinion, it is better to start out from the water motion velocity in the mixer corridors, it is an indirect approach to determining the velocity of water motion in the barrier pores, but directly depends on it.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Thus, knowing the water level difference in front and behind the porous barrier (accordingly to the piezometer), knowing the velocity of water in this mixer corridor, where the porous barrier is installed, one can determine the resistance coefficient (ξ) for the given porous barrier.

The research was carried out at the velocity of water motion in the mixer corridor from 0.1 up to 0.2 m/s.

Studies have shown that when the flow of water in the mixer corridor with velocity was about 0.1 m/s, the head losses in the barrier under research was 17 cm (0.17 m), and at the velocity of 0.2 m/s – 0.68 m.

Substituting the obtained experimental values in the formulas (1), we determine the resistance coefficient ξ . The resistance coefficient is 333.2. At the velocity of water motion in the mixer corridors from 0.7 to 0.5 m/s [12] the head losses is from 8.33 to 4.25 m respectively. Such losses are relatively great. Therefore, it is recommended to arrange the pressure mode of motion in the mixer corridors before the porous barrier along the water motion, as well as to increase the size of the aggregate grains.

Baffled mixing basins are designed in the form of channels with barriers that provide a horizontal or vertical motion of water with 180-degree turn. Head loss on one turn is determined by the formula:

$$h = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (2)$$

where ξ – resistance coefficient, which is 2.9; v – velocity of water motion in the mixer corridor, which is from 0.7 to 0.5 m/s.

The velocity of water in each mixer corridor can be found by the formula:

$$V_i = V_{i-1} - (V_{str} - V_{end}) / n, \quad (3)$$

where V_{i-1} – velocity of water motion in the previous corridor of the mixer, m/s; V_{str} – velocity of water motion in the first corridor of the mixer, which is taken 0.7 m/s; V_{end} – velocity of water motion in the last corridor of the mixer, which is taken 0.5 m/s; n – number of barriers.

Water depth in each corridor can be found by the formula:

$$H_i = H_{i-1} - h - h_n, \quad (4)$$

where H_{i-1} – depth of water in the previous mixer corridor, m; h – head loss on the flow rotation, which are defined by the formula (2); h_n – head loss in the porous barrier.

The width of each corridor is determined by the formula:

$$B_i = q_{mix} / (V_i \cdot H_i) \quad (5)$$

where q_{mix} – mixer performance, m³/s; V_i – velocity of water motion in the corridor, m/s; H_i – water depth in the corridor, m.

The construction length of the mixer is:

$$L = \sum B_i + 2\delta_{wall} + n\delta_{bar} \quad (6)$$

where $\sum B_i$ – total width of all corridors, m; δ_{wall} i δ_{bar} – thickness of the mixer wall and the barrier between corridors respectively, m.

Total mixer volume:

$$W_{mix} = 60q_{mix}t \quad (7)$$

where t – time of water presence in the mixer, which takes no more than 2 minutes.

The area of the mixer, coming from the depth of the first corridor will be:

$$\omega = W_{mix} / H_1, \quad (8)$$

Based on the mixer volume and the total width of the corridors, we find the width of the mixer

$$A = \omega / \sum B_i, \quad (9)$$

The head losses in each porous barrier are determined by the formula:

$$h_n = \xi \frac{v_c^2}{2g}, \quad (10)$$

where v_c – velocity of water motion in the corridor of the mixer, where a porous barrier is installed; ξ – the resistance coefficient, which is determined experimentally for each porous barrier.

The total head losses are:

$$\sum h = n \cdot h + h_n \cdot n_1, \quad (11)$$

where n_1 – number of porous barriers.

The thickness of the porous barrier must be not less than 50 mm, and the size of the filler is not less than 30 mm, which depends on the technological processes of mixing. Porous barriers

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

are mounted in blocks no higher than 250 mm and up to 1000 mm in length.

Findings

Studies have shown that when the water flows in the mixer corridor at a velocity of 0.1 m/s, the head losses in the porous barrier was 17 cm (0.17 m), and at a velocity of 0.2 m/s – 0.68 m. Accordingly to the obtained experimental values the resistance coefficient was determined (ξ), which is 333.2 for the investigated barrier, which makes it possible to define the head losses in the barrier including other velocities of the water.

Originality and practical value

The corridor-type baffled mixing basin with porous polymer-concrete barriers was developed and investigated, which allows increasing and regulating the intensity and time of reagent mixing with the initial water exactly in the barriers and improving the distribution of the flow through the section of the mixer corridors.

Location of removable porous barriers in the corridors of the baffled mixing basin allows to increase its performance, and improve the quality of treated water.

Conclusions

The proposed construction of an advanced corridor-type baffled mixing basin with porous polymer-concrete barriers allows to increase and regulate the intensity and time of reagent mixing with the initial water exactly in the barriers and to improve the distribution of the flow through the section of the mixer corridors. It makes possible to change timely the technological processes of mixing the reagents with the initial water, depending on the physical-chemical indicators of the initial water, types and kinds of reagents that can be used at the water purification station.

Based on the conducted experiments, it is recommended to arrange the flow pressure mode in the mixer corridors before the porous barrier according to water flow, as well as to increase the size of the aggregate grains.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Водопостачання та очистка природних вод : навч. посіб. / С. М. Епоян, В. Д. Колотило, О. Г. Друшляк [та ін.]. – Харків : Фактор, 2010. – 192 с.
2. Выровой, В. Н. Особенности структурообразования и формирования свойств полимерных композиционных материалов / В. Н. Выровой, И. В. Довгань, С. В. Семенова. – Одесса : ТЭС, 2004. – 168 с.
3. Герасимов, Г. Н. Процессы коагуляции-флокуляции при обработке поверхностных вод / Г. Н. Герасимов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 3. – С. 26–31.
4. Драгинский, В. Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод / В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева, С. В. Гетманцев. – Москва : Наука, 2005. – 576 с.
5. Журба, М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : учеб. пособие : в 3 т. / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : АСВ, 2010. – Т. 2 : Очистка и кондиционирование природных вод. – 532 с.
6. Запольский, А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води : підручник / А. К. Запольский. – Київ : Вища шк., 2005. – 671 с.
7. Мякишев, В. А. Модернизация коммунальных систем водоснабжения и водоотведения / В. А. Мякишев. – Симферополь : НАПКС, 2005. – 200 с.
8. Олейник, О. Ю. Использование полимербетона для строительства смотровых шахт систем водоотведения / О. Ю. Олейник, В. Ю. Кайдалов // Коммунальное хозяйство міст : наук.-техн. зб. / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2014. – Вип. 114. – С. 18–21.
9. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды : монография / С. М. Эпоян, Г. И. Благодарная, С. С. Душкин, В. А. Сташук ; Харьк. нац. акад. гор. хоз-ва. – Харьков : ХНАГХ, 2013. – 190 с.
10. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення : навч. посіб. / О. А. Василенко, П. О. Грабовський, Г. М. Ларкіна [та ін.]. – Київ : Укрґеліотех, 2010. – 272 с.
11. Рыбьев, И. А. Строительное материаловедение : учеб. пособие для вузов / И. А. Рыбьев. – Москва : Высш. шк., 2002. – 701 с.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

12. Теоретические основы очистки воды : учеб. пособие / Н. И. Куликов, А. Я. Найманов, Н. П. Омельченко, В. Н. Чернышев. – Донецк : Ноулидж (Донец. отд-ние), 2009. – 298 с.
13. Тугай, А. М. Водопостачання : підручник / А. М. Тугай, В. О. Орлов. – Київ : Знання, 2009. – 735 с.
14. Хоружий, П. Д. Ресурсозберігаючі технології водопостачання / П. Д. Хоружий, Т. П. Хомутецька, В. П. Хоружий. – Київ : Аграрна наука, 2008. – 534 с.
15. Шевченко, В. А. Технологии и применение специальных бетонов : учеб. пособие / В. А. Шевченко. – Красноярск : СФУ, 2012. – 201 с.
16. Эпоян, С. М. Метод повышения эффективности смешения природной воды и методика проведения исследований / С. М. Эпоян, Г. И. Сухоруков, В. А. Яркин // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. / Харк. нац. техн. ун-т буд-ва та архітектури. – Харків, 2016. – № 1 (83). – С. 187–193.
17. Biliaiev, M. M. Numerical determination of horizontal settlers performance / M. M. Biliaiev, V. A. Kozachyna // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 34–43. doi: 10.15802/stp2015/49201.
18. Bratby, J. Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment / John Bratby. – 3rd ed. – London : IWA Publishing, 2016. – 538 p. doi: 10.2166/9781780407500.
19. Kozachyna, V. A. Investigation of admixture sedimentation in the horizontal settler / V. A. Kozachyna // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 7–14. doi: 10.15802/stp2016/77827.
20. Pontius, F. W. Chitosan as a Drinking Water Treatment Coagulant / F. W. Pontius // American Journal of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 4. – Iss. 5. – P. 205–215. doi: 10.11648/j.ajce.20160405.11.

С. М. ЕПОЯН^{1*}, В. А. ЯРКІН², Г. І. СУХОРУКОВ³, С. П. БАБЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Водопостачання, каналізація і гідравліка», Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 700 38 34, ел. пошта vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0003-4551-1309

²Каф. «Водопостачання, каналізація і гідравліка», Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 700 38 34, ел. пошта vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0001-7844-6772

³Каф. «Водопостачання, каналізація і гідравліка», Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 700 38 34, ел. пошта vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0002-1740-3098

⁴Каф. «Водопостачання, каналізація і гідравліка», Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 700 38 34, ел. пошта vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0001-7918-1737

ПЕРЕГОРОДЧАСТИЙ ЗМІШУВАЧ КОРИДОРНОГО ТИПУ З ПОПЕРЕЧНИМИ ПОРИСТИМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

Мета. У роботі необхідно розглянути підвищення ефективності роботи перегородчастого змішувача коридорного типу за рахунок встановлення поперечних пористих перегородок у коридорах змішувача, виконаних із гравію (або з інших матеріалів) та епоксидної смоли марки ЕД-20 (ЕД-16) із затверджувачем поліетиленполіаміном (ПЕПА), дозволеними Міністерством охорони здоров'я України в системах господарсько-питного водопостачання. **Методика.** Перший етап експериментів проведений на моделі запропонованого змішувача у масштабі 1:4 для визначення місцевого опору пористої перегородки, яка виконана з гравію крупністю 10÷15 мм (середній діаметр 12,5 мм) і товщиною 50 мм. Місцевий опір перегородки вимірювався за допомогою п'єзометрів, встановлених перед і після пористої перегородки; швидкість руху води в коридорі змішувача визначалася в залежності від витрати води, що надходила на змішувач по лічильнику води, та об'ємним методом. **Результати.** Дослідження показали, що при русі потоку води в коридорі змішувача зі швидкістю 0,1 м/с втрати напору в пористій перегородці склали 17 см (0,17 м), а при швидкості 0,2 м/с – 0,68 м. За отриманими експериментальними значеннями був визначений коефіцієнт опору (ξ), який дорівнює 333,2 для дослідженої перегородки, що дає можливість визначити втрати напору в перегородці й при інших швидкостях руху води. При швидкості руху води в коридорах змішувача від 0,7 до 0,5 м/с втрати напору збільшуються майже в чотири рази. На основі проведених досліджень розроблена методика розрахунку перегородчастого змішувача коридорного типу з пористими полімербетонними перегородками. **Наукова новизна.** Розроблено та досліджено перегородчастий змішувач коридорного типу з пористими полімербетонними перегородками, які дозволяють підвищити й регулювати інтенсивність і час змішування

doi: 10.15802/stp2018/124428

© S. M. Epoyan, V. A. Yarkin, G. I. Sukhorukov, S. P. Babenko, 2018

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

реагентів із вихідною водою в самих перегородках, поліпшити розподіл потоку по перерізу коридорів змішувача. **Практична значимість.** Розташування знімних пористих перегородок у коридорах перегородчастого змішувача дозволяє підвищити ефективність його роботи та поліпшити якість води, що очищується.

Ключові слова: перегородчастий змішувач; поперечні перегородки; пористий полімербетон; інтенсивність змішування; підвищення ефективності роботи

С. М. ЭПОЯН^{1*}, В. А. ЯРКИН², Г. И. СУХОРУКОВ³, С. П. БАБЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Водоснабжение, канализация и гидравлика», Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 700 38 34, эл. почта vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0003-1551-1309

²Каф. «Водоснабжение, канализация и гидравлика», Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 700 38 34, эл. почта vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0001-7844-6772

³Каф. «Водоснабжение, канализация и гидравлика», Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 700 38 34, эл. почта vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0002-1740-3098

⁴Каф. «Водоснабжение, канализация и гидравлика», Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 700 38 34, эл. почта vkg.knuca@ukr.net, ORCID 0000-0001-7918-1737

ПЕРЕГОРОДЧАТЫЙ СМЕСИТЕЛЬ КОРИДОРНОГО ТИПА С ПОПЕРЕЧНЫМИ ПОРИСТЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

Цель. В работе необходимо рассмотреть повышение эффективности работы перегородчатого смесителя коридорного типа за счет установки поперечных пористых перегородок в коридорах смесителя, выполненных из гравия (или других материалов) и эпоксидной смолы марки ЭД-20 (ЭД-16) с затвердителем полиэтиленполиамином (ПЕПА), разрешенными Министерством здравоохранения Украины в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения. **Методика.** Первый этап экспериментов проведен на модели предложенного смесителя в масштабе 1:4 для определения местного сопротивления пористой перегородки, которая выполнена из гравия крупностью 10÷15 мм (средний диаметр 12,5 мм) и толщиной 50 мм. Местное сопротивление перегородки измерялось с помощью пьезометров, установленных перед и после пористой перегородки, скорость движения воды в коридоре смесителя определялась в зависимости от расхода воды, поступающей на смеситель по счетчику воды, и объемным методом. **Результаты.** Исследования показали, что при движении потока воды в коридоре смесителя со скоростью 0,1 м/с потери напора в пористой перегородке составили 17 см (0,17 м), а при скорости 0,2 м/с – 0,68 м. Из полученных экспериментальных значений был определен коэффициент сопротивления (ξ), равный 333,2 для исследованной перегородки, что позволяет определить потери напора в перегородке и при других скоростях движения воды. При скорости движения воды в коридорах смесителя от 0,7 до 0,5 м/с потери напора увеличиваются почти в четыре раза. На основе проведенных исследований разработана методика расчета перегородчатого смесителя коридорного типа с пористыми полимербетонными перегородками. **Научная новизна.** Разработан и исследован перегородчатый смеситель коридорного типа с пористыми полимербетонными перегородками, которые позволяют повысить и регулировать интенсивность и время смешения реагентов с исходной водой в самих перегородках и улучшить распределение потока по сечению коридоров смесителя. **Практическая значимость.** Расположение съемных пористых перегородок в коридорах перегородчатого смесителя позволяет повысить эффективность его работы и улучшить качество очищаемой воды.

Ключевые слова: перегородчатый смеситель; поперечные перегородки; пористый полимербетон; интенсивность смешивания; повышение эффективности работы

REFERENCES

1. Epoyan, S. M., Kolotylo, V. D., & Drushliak, O. H. (2010). *Vodopostachannia ta ochystka pryrodnykh vod: Navchalnyi posibnyk*. Kharkiv: Faktor. (in Ukrainian)
2. Vyrovoy, V. N., Dovgan, I. V., & Semenova, S. V. (2004). *Osobennosti strukturoobrazovaniya i formirovaniya svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov*. Odessa: TES. (in Russian)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

3. Gerasimov, G. N. (2001). Protsesty koagulyatsii-flokulyatsii pri obrabotke poverkhnostnykh vod. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*, 3, 26-31. (in Russian)
4. Draginskiy, V. L., Alekseeva, L. P., & Getmantsev, S. V. (2005). *Koagulyatsiya v tekhnologii ochistki prirodnikh vod*. Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Zhurba, M. G., Sokolov, L. I., & Govorova, Z. M. (2010). *Vodosnabzhenie. Proektirovanie sistem i sooruzheniy*, v 3t. T2. *Ochistka i konditsionirovanie prirodnikh vod*. Izd. 3-e, pererab. i dop.: *Uchebnoe posobie*. Moscow: ASV. (In Russian)
6. Zapolskiy, A. K. (2005). *Vodopostachannya, vodovidvedennya ta yakist vodi: Pidruchnik*. Kyiv: Vyscha shkola. (In Ukrainian)
7. Myakishev, V. A. (2005). *Modernizatsiya kommunalnykh sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya*. Simferopol: NAPKS. (In Russian)
8. Oleynik, O. Y., & Kaydalov, V. Y. (2014). Ispolzovanie polimerbetona dlya stroitelstva smotrovykh shakht sistem vodootvedeniya. *Komunalne hospodarstvo mist: naukovu-tekhnichnyi zbirnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu miskoho hospodarstva imeni O. M. Beketova*, 114, 18-21. (In Russian)
9. Epoyan, S. M., Blagodarnaya, G. I., Dushkin, S. S., & Stashuk V. A. (2013). *Povyshenie effektivnosti raboty sooruzheniy pri ochistke pitevoy vody: Monografiya*. Kharkiv: KhNAGKh. (In Russian)
10. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., & Larkina, H. M. et al. (2010). *Rekonstruktsiya i intensyfikatsiya sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia: Navchalnyi posibnyk*. Kharkiv: Ukrheliotekh. (In Russian)
11. Rybev, I. A. (2002). *Stroitelnoe materialovedenie: Uchebnoe posobie dlya VUZov*. Moscow: Vyscha shkola. (In Russian)
12. Kulikov, N. I., Naymanov, A. Y., Omelchenko, N. P., & Chernyshev, V. N. (2009). *Teoreticheskie osnovy ochistki vody: Uchebnoe posobie*. Donetsk: Noulidzh. (In Russian)
13. Tuhai, A. M., & Orlov, V. O. (2009). *Vodopostachannia: Pidruchnyk*. Kyiv: Znannia. (In Ukrainian)
14. Khoruzhyi, P. D., Khomutetska, T. P., & Khoruzhyi, V. P. (2008). *Resursozberihaiuchi tekhnolohii vodopostachannia*. Kyiv: Ahrarna nauka. (In Ukrainian)
15. Shevchenko, V. A. (2012). *Tekhnologiya i primenenie spetsialnykh betonov: Uchebnoe posobie*. Krasnoyarsk: SFU. (In Russian)
16. Epoyan, S. M., Sukhorukov, G. I., & Yarkin, V. A. (2016). Metod povysheniya effektivnosti smeshcheniya prirodnoy vody i metodika provedeniya issledovaniy. *Naukoviy visnik budivnitstva*, 1(83), 187-193. (In Russian)
17. Biliaiev, M. M., & Kozachyna, V. A. (2015). Numerical determination of horizontal settlers performance. *Science and Transport Progress*, 4(58), 34-43. doi: 10.15802/stp2015/49201. (in English)
18. Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. Third Ed.* London: IWA Publishing. (In English)
19. Kozachyna, V. A. (2016). Investigation of admixture sedimentation in the horizontal settler. *Science and Transport Progress*, 4(64), 7-14. (In English)
20. Pontius, F. W. (2016). Chitosan as a Drinking Water Treatment Coagulant. *American Journal of Civil Engineering*, 4(5), 205-215. doi: 10.11648/j.ajce.20160405.11. (In English)

Prof. M. M. Biliaiev, Dr. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Received: Oct. 10, 2017

Accessed: Jan. 11, 2018

УДК 004.9

Е. Н. ЛЯШЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Інформаційні технології», Херсонський національний технічний університет, Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73008, тел. +38 (050) 500 86 28, ел. пошта olenakntu@gmail.com, ORCID 0000-0002-5429-8389

МОДЕЛЬ КООРДИНАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Цель. Статья посвящена разработке модели координации взаимодействия органов управления при ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций (ЧС). **Методика.** Методы исследования включают математический аппарат теории иерархических многоуровневых систем, логику предикатов, а также принципы централизованного управления, которые предполагают наличие единого координационного центра управления при возникновении крупномасштабных ЧС. Центр определяет основные правила взаимодействия органов управления, а также сил и средств Гражданской защиты Украины при реализации тактических планов действий по локализации и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. **Результаты.** На основе разработанной модели предложен подход к решению задачи координации взаимодействия органов управления при ликвидации последствий крупномасштабных чрезвычайных ситуаций в условиях неопределенности и неполноты информации, а также дефицита времени на принятие управленческих решений. Специфика модели заключается в использовании математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем и логики предикатов для реализации процедур согласования трех типов целей, формально описываемых тремя типами задач: 1) глобальной задачей, решение которой направлено на достижение общей цели системы, заключающейся в минимизации последствий от чрезвычайных ситуаций; 2) задачей координирующего органа управления, в ходе решения которой достигается согласованное функционирование специализированных аварийно-спасательных формирований и подразделений при осуществлении комплекса мероприятий по ликвидации последствий в зоне возникновения чрезвычайных ситуаций; 3) локальными задачами органов управления ликвидацией чрезвычайных ситуаций, решение которых направлено на достижение общей глобальной цели системы. **Научная новизна.** Впервые предложена структура иерархической многоуровневой системы координации взаимодействия органов управления при ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций. Выделены уровни управления системой. Предложен подход к решению задачи координации взаимодействия органов управления в условиях неопределенности и неполноты информации. Координация обеспечивается за счет процедур согласования целей и задач, решаемых на разных уровнях иерархии рассматриваемой системы, в условиях централизованного управления и неординарности возникающих управленческих ситуаций. **Практическая значимость.** Результаты работы смогут найти приложение в задачах координационного управления и принятия решений в иерархических многоуровневых системах гражданской защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: координация взаимодействия; иерархическая многоуровневая система; чрезвычайные ситуации; органы управления; управленческие решения

Введение

Количество чрезвычайных ситуаций (ЧС), обусловленных опасными природными явлениями, на территории Украины из года в год сохраняет устойчивую тенденцию роста и увеличения масштабов последствий.

Важную роль в снижении тяжести последствий от ЧС играет правильность и обоснованность управленческих решений, принимаемых в процессе их ликвидации.

Одной из важных функций управления в условиях возникновения крупномасштабных ЧС является координация взаимодействия сил гражданской защиты Украины (ГЗУ), которые обеспечивают выполнение комплекса мероприятий и работ по ликвидации последствий в зоне возникновения ЧС.

Анализ факторов и особенностей принятия управленческих решений в условиях ЧС позволяет сделать вывод, что решения о проведении работ по ликвидации последствий крупномас-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

штабных ЧС (особенно на первоначальной стадии их возникновения и развития) принимаются в условиях неопределенности и неполноты информации о параметрах распространения ЧС, требуемых темпах ликвидации, необходимом объеме ресурсов, а также уровне сложности работ по ликвидации ЧС [8].

Следует также отметить, что чем выше сложность и масштаб распространения ЧС, тем труднее обеспечивать эффективную координацию взаимодействия привлекаемых сил ГЗУ. При этом складывающийся в условиях ЧС дефицит времени для всестороннего анализа обстановки в зоне возникновения ЧС, а также неординарность возникающих управленческих ситуаций усугубляет проблему координации, которая становится трудноразрешимой.

Таким образом, разработка модели, которая позволит осуществлять координацию взаимодействия органов управления, а также привлекаемых специализированных аварийно-спасательных формирований ГЗУ при ликвидации последствий ЧС в условиях неопределенности и неполноты информации, и дефицита времени на принятие управленческих решений является важной и актуальной научно-практической проблемой.

Цель

Целью исследования является разработка модели координации взаимодействия органов управления при ликвидации крупномасштабных ЧС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать структуру иерархической многоуровневой системы координации взаимодействия органов управления при ликвидации крупномасштабных ЧС. Выделить уровни управления системой. Выявить особенности координационного управления данной системой.

2. Разработать процедуры согласования целей, задач и взаимодействий органов управления на различных уровнях иерархии системы.

3. Разработать модель, позволяющую получить искомое решение задачи координации взаимодействия органов управления при ликвидации последствий крупномасштабных ЧС.

Методика

Согласно с [1] под ликвидацией последствий ЧС понимается комплекс мероприятий, включающих аварийно-спасательные и другие неотложные работы, осуществляемые в зоне возникновения ЧС, а также прилегающих к ней территорий. Они направлены на прекращение действия опасных факторов, вызванных ЧС, спасение жизни и сохранение здоровья населения, а также на локализацию зоны и минимизацию последствий ЧС.

Успех проведения комплекса аварийно-спасательных мероприятий напрямую зависит от скоординированного взаимодействия сил ГЗУ, осуществляемого в соответствии с планами реагирования на ЧС.

Для организации аварийно-спасательных работ и координации взаимодействия сил ГЗУ непосредственно в зоне возникновения ЧС создается Штаб по ликвидации последствий ЧС (Штаб по ЧС). Основными функциями штаба являются [6, 7]: 1) определение зоны ЧС и зоны возможного поражения; 2) сбор данных об обстановке в зоне ЧС, их анализ и обобщение, прогнозирование масштабов распространения и последствий ЧС; 3) разработка оперативных планов ликвидации последствий ЧС; 4) определение состава и количества сил ГЗУ, привлекаемых к процессу ликвидации последствий ЧС, сроков их привлечения согласно планам ликвидации последствий ЧС; 5) непосредственная организация и координация взаимодействия привлеченных к ликвидации последствий ЧС сил ГЗУ.

Руководство работой Штаба по ЧС осуществляет начальник Штаба по ЧС. В зависимости от масштаба распространения ЧС, объема аварийно-спасательных и других неотложных работ по ликвидации последствий ЧС по решению начальника Штаба по ЧС в его составе создаются следующие рабочие группы [1, 6]: группа анализа ЧС и подготовки данных; группа непосредственного реагирования на ЧС; организационная группа, функцией которой является регистрация распоряжений руководителя работ по ликвидации последствий ЧС; группа управления резервом сил, которые дополнительно привлекаются к ликвидации последствий ЧС; группа представителей органов власти, функцией которой является контроль за

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

проведенням аварійно-спасательних, других неотложных работ, представления отчетных материалов группе анализа ЧС и подготовки данных; группа материально-технического обеспечения; группа организации связи в зоне

ЧС; группа взаимодействия с населением и средствами массовой информации.

Процесс ликвидации последствий ЧС включает в себя три взаимосвязанных этапа [7].

На первом этапе реализуются мероприятия по экстренной защите населения.

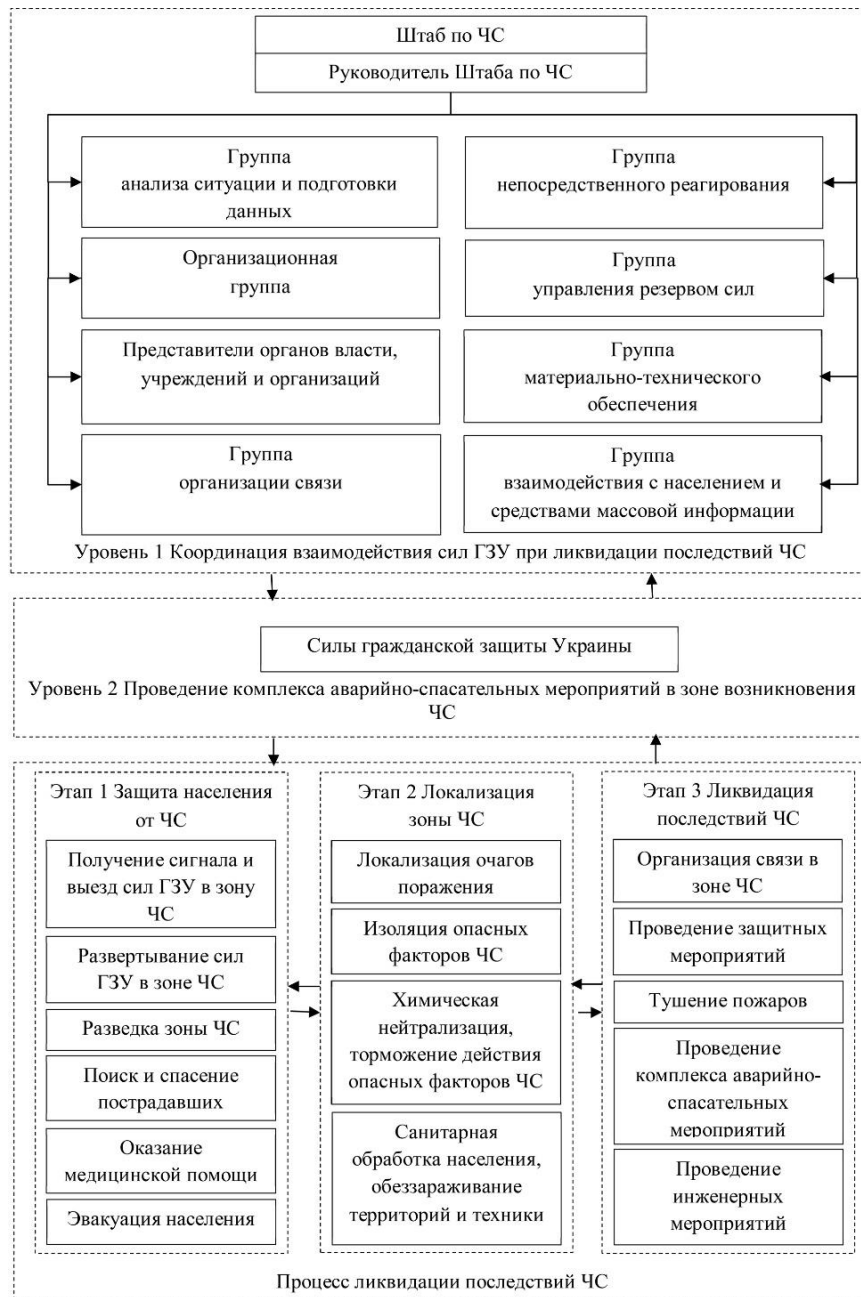


Рис. 1. Структура системы координации взаимодействия органов управления при ликвидации крупномасштабных ЧС

Fig. 1. Structure of control bodies coordination system during response to large-scale emergencies

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Проводяться пошук і спасення постраждалих, евакуація людей із небезпечних зон і надання їм першої медичної допомоги.

На другому етапі проводяться заходи по локалізації осередків ураження, ізоляції небезпечних факторів ЧС, хімічної нейтралізації і затримання дії небезпечних факторів ЧС.

В разі викиду в навколишнє середовище токсичних хімічних речовин проводиться комплекс заходів по санітарній обробці населення і обеззараженню територій і техніки в зоні ЧС.

На заключному третьому етапі проводяться захисні заходи, заходи по тушенню пожеж, комплекс аварійно-спасальних і інженерних заходів з метою ліквідації наслідків ЧС.

Структура системи координації взаємодії органів управління при ліквідації великомасштабних ЧС наведена на рис. 1.

Система має чітко виражену ієрархічну структуру, що дозволяє віднести її до класу ієрархічних багаторівневих систем.

Задачею першого рівня є координація взаємодії сил ГЗУ при ліквідації наслідків ЧС. Координуючим органом управління (координатором) на даному рівні є Штаб по ЧС.

Задачею другого рівня є проведення комплексу аварійно-спасальних заходів в зоні виникнення ЧС. Органами управління ліквідацією ЧС, функціонуючими на даному рівні, є спеціалізовані аварійно-спасальні формування і підрозділи ГЗУ, приймаючі участь в процесі ліквідації наслідків ЧС.

Розглянемо далі модель координації взаємодії органів управління в ієрархічній багаторівневій системі в процесі ліквідації наслідків ЧС. Для цього представимо структуру системи (рис. 1) в формі ієрархії рівнів управління, ґрунтуючись на дослідженнях [2–5, 10–12].

Система (рис. 2) має один координуючий орган управління S_0 , n підпорядкованих йому органів управління ліквідацією ЧС S_1, \dots, S_n і управляємий процес E , який представляє собою послідовність етапів ліквідації наслідків ЧС.

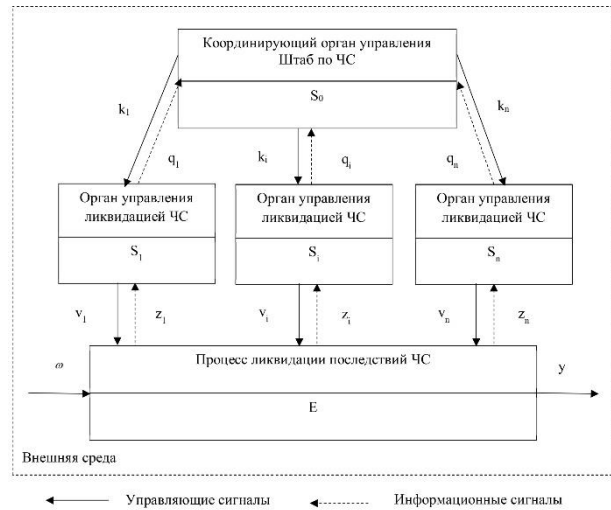


Рис. 2. Координаційне взаємодія органів управління в процесі ліквідації наслідків ЧС

Fig. 2. Coordination of control bodies in emergency response

В умовах виникнення ЧС для координатора можливі наступні варіанти організації взаємодії з органами управління ліквідацією ЧС [5]:

По засобах передачі управляючих сигналів. Сигнали від координатора S_0 до S_1, \dots, S_n будемо називати координуючими, а сигнали від S_1, \dots, S_n до процесу E будемо називати управляючими впливами.

По засобах передачі інформаційних сигналів (сигналів зворотного зв'язу) органам управління, функціонуючим на всіх рівнях розглядаваної системи.

На вхід процесу E поступають сигнали двох видів: управляючі впливи v від S_1, \dots, S_n , $v \in V$, де V – множина управляючих впливів, і сигнали зовнішнього середовища ω , $\omega \in \Omega$, де Ω – множина сигналів, представляючих собою зовнішні впливи, що поступають в розглядавану систему при зміні параметрів навколишнього середовища (наприклад, температури повітря, напрямлення, сили і швидкості вітру).

Обозначимо символом y вихід процесу E , $y \in Y$, де Y – множина виходів процесу E .

Кожний орган S_i управління ліквідацією ЧС може вибрати i -ю компоненту v_i управ-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ляющего воздействия v , оказывая тем самым определенное влияние на процесс ликвидации последствий ЧС.

Управляющее воздействие в этом случае осуществляется в форме управленческого решения о реализации тактических планов действий по локализации и ликвидации последствий ЧС, планов мобилизации и взаимодействия сил и средств, привлекаемых для ликвидации ЧС.

На вход органов управления ликвидацией ЧС также поступают сигналы двух видов: координирующий сигнал k , $k \in K$, где K – множество координирующих сигналов, поступающих от координатора, и информационный сигнал z , $z \in Z$, где Z – множество информационных сигналов, поступающих от управляемого процесса E .

Координирующий сигнал k представляет собой n -мерный вектор $k = (k_1, \dots, k_n)$, следовательно, на вход каждого S_i поступает только i -я компонента k_i .

Информационный сигнал z_i , поступающий на вход S_i , содержит информацию об управляемом процессе E .

Выходом каждого органа S_i управления ликвидацией ЧС является управленческое решение v_i , выбираемое из множества V_i , которое оказывает определенное воздействие на управляемый процесс E и вызывает (при отсутствии возмущений) однозначную реакцию по изменению значений и параметров, характеризующих состояние рассматриваемого процесса.

Таким образом, данное управленческое решение можно рассматривать в качестве первопричины изменения состояния управляемого процесса E .

На вход координатора S_0 по средствам обратной связи поступают информационные сигналы q , $q \in Q$, где Q – множество информационных сигналов от S_1, \dots, S_n .

Информационный сигнал q также представляет собой n -мерный вектор $q = (q_1, \dots, q_n)$, следовательно, на вход координатора S_0 от каждого S_i органа управления ликвидацией ЧС

по средствам обратной связи поступает информационный сигнал q_i .

Информационные сигналы представляют собой оперативную информацию о типе, объекте, территории, времени, параметрах распространения ЧС, требуемых темпах ликвидации, необходимом объеме ресурсов, а также об уровне сложности работ по ликвидации ЧС. Впоследствии полученная информация будет использована координатором S_0 для формирования координирующих сигналов k .

Под координацией взаимодействия будем понимать задачу координатора S_0 , в ходе решения которой достигается согласованное функционирование органов управления ликвидацией ЧС S_1, \dots, S_n при осуществлении комплекса мероприятий, направленных на локализацию зон ЧС, прекращение действия характерных для ЧС опасных факторов, ликвидацию последствий ЧС, а также защиту населения и территорий от ЧС.

Успех координатора S_0 в осуществлении координации взаимодействия можно оценить по отношению к общей глобальной цели системы, которая заключается в минимизации последствий от ЧС. В свою очередь, достижение глобальной цели системы напрямую зависит от решения ряда локальных задач органами управления ликвидацией ЧС S_1, \dots, S_n . Среди них можно выделить [7]: 1) разведку зоны ЧС, определение районов, участков и объектов, на которых необходимо проведение аварийно-спасательных работ, выявление и обозначение на местности районов, подвергшихся химическому и биологическому заражению; 2) организацию связи в зоне ЧС; 3) поиск и спасение пострадавших, оказание им экстренной медицинской помощи и транспортировки в учреждения здравоохранения, эвакуацию или отселение людей из зоны ЧС; 4) локализацию зоны ЧС, прекращение или уменьшение действия опасных факторов, вызванных ЧС; 5) санитарную обработку людей, техники, оборудования, зданий, сооружений и территорий, подвергшихся радиоактивному, химическому и биологическому загрязнению; 6) оказание экстренной медицинской помощи пострадавшему населению, проведение санитарно-противоэпидемических мероприятий в районе возникновения ЧС и ме-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

стах временного размещения пострадавшего населения; 7) восстановление поврежденных объектов жизнеобеспечения населения, коммунальных сетей, транспорта, связи, проведение других необходимых работ и мероприятий в зависимости от характера и вида ЧС.

Итак, пусть Γ – глобальная задача, решение которой направлено на достижение общей глобальной цели системы, а G_0 – задача, решаемая координатором S_0 .

Предположим, что координирующий сигнал k и информационный сигнал q будут конкретизировать задачу $G_i(k, q)$, решаемую каждым органом S_i управления ликвидацией ЧС.

Пусть далее $\bar{G}(k, q) = \{G_1(k, q), \dots, G_n(k, q)\}$ – множество локальных задач, решаемых органами управления ликвидацией ЧС S_1, \dots, S_n . Тогда решением каждой i -й локальной задачи $G_i(k, q)$ будет x_i – компонент n -мерного вектора $x = (x_1, \dots, x_n)$, $x \in X$, где X – множество решений.

Согласно [3, 5, 10] определим $P(x, G)$ для всех пар (x, G) как предикат $P(x, G) \equiv x$. Предикат $P(x, G)$ является истинным только тогда, когда G – решаемая задача, а x – одно из ее решений.

Предположим, что задачи, решаемые органами управления ликвидацией ЧС S_1, \dots, S_n , координируемы по отношению к задаче, решаемой координатором S_0 только тогда, когда справедливо следующее утверждение:

$$(\exists k)(\exists q)(\exists x) \left[P(x, \bar{G}(k, q)) \vee P(k, q, G_0) \right]. \quad (1)$$

Зависимость решения задачи G_0 от результатов, полученных на выходах S_1, \dots, S_n , можно представить в виде следующего утверждения:

$$P(k, q, G_0) \Leftrightarrow (\exists x) [A_0(k, q, x)], \quad (2)$$

где $A_0(k, q, x)$ – заданный n -местный предикат, определенный для (k, q, x) из $K \times Q \times X$, где X – декартово произведение множества решений X_i : $X = X_1 \times \dots \times X_n$.

Из утверждения (2) следует, что координирующий сигнал k и информационный сигнал q

решают задачу G_0 только тогда, когда существует соответствующее решение x , полученное на выходе S_1, \dots, S_n , такое, что условие, выраженное предикатом $A_0(k, q, x)$, удовлетворяется.

Таким образом, решение задачи G_0 состоит в том, чтобы найти k и q , – такие, что $G_0(k, q, x)$ выполняется для решения x , получаемого на выходе S_1, \dots, S_n .

На основе (1) и (2) утверждение о координируемости по отношению к задаче, решаемой координатором S_0 , можно представить в виде:

$$(\exists k)(\exists q)(\exists x) \left[P(x, \bar{G}(k, q)) \vee A_0(k, q, x) \right]. \quad (3)$$

Согласно (1) – (3) координатор S_0 оказывает такое влияние на органы управления ликвидацией ЧС S_1, \dots, S_n , что их результирующее воздействие на процесс E дает решение глобальной задачи Γ . Таким образом, глобальная задача Γ определяется для всего управляемого процесса E , и множеством решений этой задачи можно считать множество всех допустимых управлений U .

Как уже отмечалось ранее, органы управления ликвидацией ЧС S_1, \dots, S_n оказывают влияние на процесс E средствами управляющих воздействий v . Следовательно, можно предположить, что задачи, решаемые S_1, \dots, S_n , координируемы относительно глобальной задачи Γ , только тогда, когда справедливо следующее утверждение:

$$(\exists k)(\exists q)(\exists x) \left[P(x, G(k, q)) \vee P(V_U(x), \Gamma) \right]. \quad (4)$$

Если задачи органов управления ликвидацией ЧС S_1, \dots, S_n координируемы в соответствии с (3) – относительно задачи координатора S_0 – и в соответствии с (4) – относительно глобальной задачи Γ , то можно сделать предположение о координируемости рассматриваемой системы в целом:

$$(\forall k)(\forall q)(\forall x) \left\{ \left[P(x, \bar{G}(k, q)) \vee A_0(k, q, x) \right] \Rightarrow \Rightarrow P(V_U(x), \Gamma) \right\}. \quad (5)$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Результаты

Предложенные процедуры согласования целей, задач и взаимодействий органов управления на различных уровнях иерархии системы управления позволяют получить искомое решение задачи координации в условиях дефицита времени для всестороннего анализа обстановки в зоне возникновения ЧС, а также временных ограничений на принятие управленческих решений в условиях ЧС.

На основе предложенной в работе модели разработана информационная система координационного управления (СКУ) в условиях возникновения крупномасштабных ЧС (рис. 3), которая состоит из четырех подсистем: подсистем оперативного доступа, моделирования, подсистемы поддержки принятия решений и подсистемы баз данных (БД) [2, 9, 11, 13].

В зависимости от масштабов и особенностей ЧС, которая прогнозируется или возникла, СКУ может функционировать в режимах: повседневной деятельности, повышенной готовности (при угрозе возникновения ЧС) и чрезвычайной ситуации (при возникновении и ликвидации ЧС). Выбор режима функционирования СКУ осуществляется в подсистеме оперативного доступа.

Основными задачами СКУ в режиме повседневной деятельности являются: разработка паспорта ЧС, который содержит информацию о типе, объекте, территории, времени и параметрах ЧС; учет потенциально опасных участков и объектов для проведения работ по предупреждению возникновения ЧС; учет состава сил и средств, привлекаемых для ликвидации ЧС; разработка проектов планов мобилизации сил и средств, привлекаемых для ликвидации ЧС; определение потребности в финансовых и материально-технических ресурсах.

Основными задачами СКУ в режиме повышенной готовности являются: автоматизированная обработка данных о ЧС и оценка обстановки, сложившейся в результате ЧС; определение необходимого состава сил и средств для ликвидации ЧС, сроков проведения и объема запланированных работ; расчет рационального состава сил и средств для проведения выбранных видов работ, в том числе их обеспечения (продовольственного, материально-технического, медицинского и др.).

Основными задачами СКУ в режиме чрезвычайной ситуации являются: прогнозирование развития ЧС; организация перевозки сил и материально-технических средств, в соответствии с планом мобилизации; ликвидация последствий ЧС – в соответствии с разработанным планом взаимодействий.

Соответствующие функциональные возможности представлены в подсистемах моделирования и поддержки принятия решений.

Информационное обеспечение СКУ представлено в виде совокупности ситуационных планов взаимодействий по ликвидации ЧС, планов мобилизации и координации взаимодействия сил и средств, привлекаемых для ликвидации ЧС, а также структурированных наборов данных о ЧС.

Информационное обеспечение СКУ осуществляется с помощью подсистемы БД.

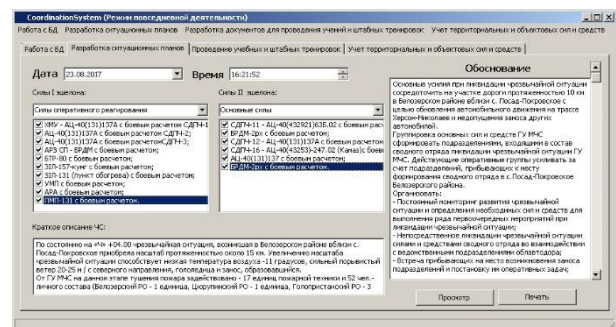


Рис. 3. Режим повседневной деятельности информационной системы координационного управления (разработка ситуационных планов)

Fig. 3. Daily activity mode of the coordination control information system (development of situational plans)

Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложена структура иерархической многоуровневой системы координации взаимодействия органов управления при ликвидации крупномасштабных ЧС. Выделены уровни управления системой.

На основе разработанной модели предложен подход к решению задачи координации взаимодействия органов управления при ликвидации последствий крупномасштабных ЧС.

Специфика модели заключается в использовании математического аппарата теории иерар-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

хических многоуровневых систем и логики предикатов для реализации процедур согласования трех типов целей, формально описываемых тремя типами задач: 1) глобальной задачей, решение которой направлено на достижение общей глобальной цели системы, заключающейся в минимизации последствий от ЧС; 2) задачей координирующего органа управления, в ходе решения которой достигается согласованное функционирование специализированных аварийно-спасательных формирований и подразделений при осуществлении комплекса мероприятий по ликвидации последствий в зоне возникновения ЧС; 3) локальными задачами органов управления ликвидацией ЧС, решение которых направлено на достижение общей глобальной цели системы.

Полученные результаты стали основой для разработки информационной СКУ в условиях возникновения крупномасштабных ЧС.

Назначение СКУ заключается в обеспечении руководителей по ликвидации последствий ЧС информационной поддержкой при выполнении основных задач координационного управления в условиях возникновения крупномасштабных ЧС.

Таким образом, результаты работы смогут найти приложение в задачах координационного управления и принятия решений в иерархических многоуровневых системах гражданской защиты населения и территорий от ЧС.

Выводы

В работе представлены результаты исследования в области моделирования процессов ко-

ординации взаимодействия органов управления в условиях возникновения крупномасштабных ЧС.

Предложена иерархическая многоуровневая структура системы управления в условиях возникновения ЧС.

Установлено, что в рассматриваемой системе имеются цели трех типов, формально описываемые тремя типами задач: глобальной задачей, задачей координирующего органа управления и локальными задачами органов управления ликвидацией ЧС.

Реализованы процедуры согласования данных типов целей на основе использования математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем и логики предикатов.

На основе разработанной модели предложен подход к решению задачи координации взаимодействия органов управления при ликвидации последствий ЧС в условиях неопределенности и неполноты информации, а также дефицита времени на принятие управленческих решений.

Координация обеспечивается за счет процедур согласования целей и задач, решаемых на разных уровнях иерархии рассматриваемой системы, в условиях централизованного управления и неординарности возникающих управленческих ситуаций.

Реализован прототип информационной СКУ в условиях возникновения крупномасштабных ЧС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кодекс цивільного захисту України [Електронний ресурс] : закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI // Офіційний вісник України. – 2012. – № 89. – Режим доступу: <https://docs.dtkr.ua/doc/1011.64.0>. – Загл. с экрана. – Проверено : 24.01.2018.
2. Ляшенко, Е. Н. Моделирование процессов координационного управления и принятия решений в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера / Е. Н. Ляшенко, Д. Л. Кирийчук, Р. С. Ложкин // Наук. вісн. Херсон. держ. мор. акад. – 2017. – № 1 (16). – С. 76–86.
3. Маслובоев, А. В. Координация в многоуровневых сетцентрических системах управления региональной безопасностью: подход и формальная модель / А. В. Маслובоев, В. А. Путилов, А. В. Сютин // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 130–138. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-130-138.
4. Маслובоев, А. В. Многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региона / А. В. Маслובоев, В. А. Путилов, А. В. Сютин // Науч.-техн. вестн. информ. технологий, механики и оптики. – 2014. – Т. 14, № 6. – С. 163–170.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

5. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахаара. – Москва : Мир, 1973. – 344 с.
6. Положення про штаб з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації [Електронний ресурс] : затв. Наказом М-ва внутрішніх справ України від 26.12.2014 р. № 1406. – Режим доступа: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0047-15>. – Загл. с екрана. – Проверено : 24.01.2018.
7. Статут дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту [Електронний ресурс] : затв. Наказом М-ва надзвичайних ситуацій України від 13.03.2012 р. № 575. – Режим доступа: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0835-12/page>. – Загл. с екрана. – Проверено : 24.01.2018.
8. Ямалов, И. У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций / И. У. Ямалов. – Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2009. – 288 с.
9. An integrated decision support system for emergency evacuation management / Y. Liu, G. Wang, Z. Jiang [et al.] // Systems, Man, and Cybernetics (SMC) : IEEE International Conference (9–12 Oct. 2016). – Budapest, Hungary, 2016. – P. 000940–000946. doi: 10.1109/SMC.2016.7844362.
10. Control and coordination in hierarchical systems (International series on applied systems analysis) / W. Findeisen, F. N. Bailey, M. Bryds [et al.]. – London, UK : John Wiley and Sons, 1980. – 478 p.
11. Liashenko, O. Developing a model for coordination activities in decision making support system for eliminating consequences of natural emergencies / O. Liashenko, D. Kyryichuk // Фундаментальні та прикладні дослідження в сучасній науці : матеріали V заоч. наук. конф. (31 жовт. 2017 р.). – Харків, 2017. – С. 65.
12. Tang, P. Decision-making model to generate novel emergency response plans for improving coordination during large-scale emergencies / P. Tang, G. Qiping Shen // Knowledge-Based Systems. – 2015. – Vol. 90. – Iss. C. – P. 111–128. doi: 10.1016/j.knosys.2015.09.027.
13. Towards the development of a decision support system for multi-agency decision-making during cross-border emergencies / K. Neville, S. O’Riordan, A. Pope [et al.] // Journal of Decision Systems. – 2016. – Vol. 25. – Issue sup1. – P. 381–396. doi: 10.1080/12460125.2016.1187393.

О. М. ЛЯШЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Інформаційні технології», Херсонський національний технічний університет, Бериславське шосе, 24, Херсон, Україна, 73008, тел. +38 (050) 500 86 28, ел. пошта olenakntu@gmail.com, ORCID 0000-0002-5429-8389

МОДЕЛЬ КООРДИНАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ ОРГАНІВ УПРАВЛІННЯ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Мета. Стаття присвячена розробці моделі координації взаємодії органів управління при ліквідації великомасштабних надзвичайних ситуацій (НС). **Методика.** Методи дослідження включають математичний апарат теорії ієрархічних багаторівневих систем, логіку предикатів, а також принципи централізованого керування, які передбачають наявність єдиного координаційного центру керування при виникненні великомасштабних НС. Центр визначає основні правила взаємодії органів управління, а також сил і засобів цивільного захисту України при реалізації тактичних планів дій по локалізації та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. **Результати.** На основі розробленої моделі запропоновано підхід до вирішення завдання координації взаємодії органів управління при ліквідації наслідків великомасштабних надзвичайних ситуацій в умовах невизначеності та неповноти інформації, а також дефіциту часу на прийняття управлінських рішень. Специфіка моделі полягає у використанні математичного апарату теорії ієрархічних багаторівневих систем і логіки предикатів для реалізації процедур узгодження трьох типів цілей, що формально описуються трьома типами завдань: 1) глобального завдання, вирішення якого спрямовано на досягнення загальної мети системи, що полягає у мінімізації наслідків від надзвичайних ситуацій; 2) завдання координуючого органу управління, в ході вирішення якого досягається узгоджене функціонування спеціалізованих аварійно-рятувальних формувань та підрозділів при здійсненні комплексу заходів по ліквідації наслідків у зоні виникнення надзвичайних ситуацій; 3) локальних завдань органів управління ліквідацією надзвичайних ситуацій, вирішення яких спрямоване на досягнення загальної глобальної мети системи. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано структуру ієрархічної багаторівневої системи координації взаємодії органів управління при ліквідації великомасштабних надзвичайних ситуацій. Виділено рівні управління системою. Запропоновано підхід до

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вирішення завдання координації взаємодії органів управління в умовах невизначеності та неповноти інформації. Координація забезпечується за рахунок процедур узгодження цілей та завдань, що вирішуються на різних рівнях ієрархії даної системи, в умовах централізованого управління й неординарності управлінських ситуацій. **Практична значимість.** Результати роботи можуть знайти застосування в задачах координаційного керування та прийняття рішень в ієрархічних багаторівневих системах цивільного захисту населення й територій від надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: координація взаємодії; ієрархічна багаторівнева система; надзвичайні ситуації; органи управління; управлінські рішення

О. М. LIASHENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Information Technologies», Kherson National Technical University, Beryslavske Shosse, 24, Kherson, Ukraine, 73008, tel. +38 (050) 500 86 28, e-mail olenakntu@gmail.com, ORCID 0000-0002-5429-8389

CONTROL BODY COORDINATION MODEL IN THE PROCESS OF RESPONSE TO LARGE-SCALE EMERGENCIES

Purpose. The article is devoted to developing the control body coordination model in the process of response to large-scale emergencies. **Methodology.** Research methods include a mathematical apparatus of the theory of hierarchical multi-level systems, predicate logic, as well as the principles of centralized management, which imply the existence of a single coordination control center in the case of occurrence of large-scale emergencies, which would determine basic rules of cooperation between control bodies, as well as the manpower and resources of the Civil Defense of Ukraine when implementing tactical action plans for the localization and recovery of emergency consequences. **Findings.** Based on the devised model, we propose an approach to solving the task of coordination between control bodies in the process of response to large-scale emergencies under conditions of uncertainty and incomplete information, as well as time constraints for making managerial decisions. The specifics of the model is in the use of mathematical apparatus of the theory of hierarchical multi-level systems and predicate logic in order to implement the procedures of coordination of three types of objectives, formally described by three types of tasks: 1) a global task whose solution is aimed at achieving a common global objective of the system, specifically, to minimize the consequences of emergencies; 2) a task of coordinating control body, the solving of which achieves a coordinated functioning of specialized rescue units and squads during implementation of a set of measures to liquidate consequences in the area of emergencies; 3) local tasks for control bodies over the response to emergencies, solving which aims at achieving a common global objective of the system. **Originality.** We proposed for the first time a structure of the hierarchical multi-level system for coordination between control bodies in the process of response to large-scale emergencies. The levels of system management are determined. The approach is proposed to solving a task of the coordination between control bodies under conditions of uncertainty and incomplete information. Coordination is ensured through the procedures of coordinating goals and tasks solved at different levels in the hierarchy of the considered system, under conditions of centralized management and the originality of emerging management situations. **Practical value.** Results of the present work might be applied in the tasks of coordinating management and decision-making in hierarchical multi-level systems of civil protection of population and territories from emergencies.

Keywords: coordination; hierarchical multi-level system; emergencies; control bodies; management decisions

REFERENCES

1. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy: zakon Ukrainy № 5403-VI. (2012). Ofitsiyni visnyk Ukrainy, 89. Retrived from <https://docs.dtkr.ua/doc/1011.64.0>. (in Ukrainian)
2. Lyashenko, Y. N., Kiriychuk, D. L., & Lozhkin, R. S. (2017). Modelirovanie protsessov koordinatsionnogo upravleniya i prinyatiya resheniy v usloviyakh vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy prirodnoho kharaktera. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 1(16), 76-86. (in Russian)
3. Masloboev, A. V., Putilov, V. A., & Syutin, A. V. (2015). Koordinatsiya v mnogourovnevnykh setetsentricheskikh sistemakh upravleniya regio-nalnoy bezopasnostyu: podkhod i formalnaya model. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 1(15), 130-138. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-130-138. (in Russian)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

4. Masloboev, A. V., Putilov, V. A., & Syutin, A. V. (2014). Mnogourovnevaya rekurrentnaya model ierarkhicheskogo upravleniya kompleks-noy bezopasnostyu regiona. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 6(94), 163-170. (in Russian)
5. Mesarovich, M., Mako, D., & Takakura, I. (1973). *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh system*. Moscow: Mir. (in Russian)
6. Polozhennia pro shtab z likvidatsii naslidkiv nadzvychainoi sytuatsii. № 1406. (2014). Retrieved from <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0047-15>. (in Ukrainian)
7. Statut dii u nadzvychainykh sytuatsiiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operativno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu. № 575. (2012). Retrieved from <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0835-12/page>. (in Ukrainian)
8. Yamalov, I. U. (2009). *Modelirovanie protsessov upravleniya i prinyatiya resheniy v usloviyakh chrezvychaynykh situatsiy*. Moscow: Laboratoriya Bazovykh Znaniy. (in Russian)
9. Liu, Y., Wang, G., Jiang, Z., Qian, J., & Chen, Y. (2016). An integrated decision support system for emergency evacuation management. *Systems, Man, and Cybernetics (SMC): IEEE International Conference (9–12 Oct. 2016)*, 000940-000946. doi: 10.1109/SMC.2016.7844362. (in English)
10. Findeisen, W., Bailey, F. N., Bryds, M., Malinowski, K., Tatjewski, P., & Wozniak, A. (1980). *Control and coordination in hierarchical systems*. International Institute for Applied Systems Analysis. London: John Wiley and Son. (in English)
11. Liashenko, O., & Kyrychuk, D. (2017). Developing a model for coordination activities in decision making support system for eliminating consequences of natural emergencies. *Fundamentalni ta prykladni doslidzhennia v suchasni nautsi: materialy V zaochnoi naukovoi konferentsii*, 65. (in English)
12. Tang, P., & Qiping Shen, G. (2015). Decision-making model to generate novel emergency response plans for improving coordination during large-scale emergencies. *Knowledge-Based Systems*, 90(C), 111-128. doi: 10.1016/j.knosys.2015.09.027. (in English)
13. Neville, K., O’Riordan, S., Pope A., Rauner, M., Rochford, M., Madden, M., ... O’Brien, C. (2016). Towards the development of a decision support system for multi-agency decision-making during cross-border emergencies. *Journal of Decision Systems*, 25(1), 381-396. doi:10.1080/12460125.2016.1187393. (in English)

Статья рекомендована к публикации д.т.н. В. Л. Горобцом (Украина)

Поступила в редколлегию: 20.11.2017

Принята к печати: 01.03.2018

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.45.7.048

С. Р. КОЛЕСНИКОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта ser.koles13@gmail.com, ORCID 0000-0002-0487-9257

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАСАЖИРСЬКОГО РУХОМОГО СКЛАДУ: ОГЛЯД ПАТЕНТІВ

Мета. Удосконалення основних систем життєзабезпечення, в т. ч. забезпечення параметрів якісного мікроклімату в вагоні рухомого складу, знаходяться в фокусі уваги винахідників і дослідників світу. Дослідження спрямовано на огляд та аналіз патентів у напрямі системи клімат-комфарту, опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ССНВАС) залізничних пасажирських вагонів (хронологічні рамки: 2011-2017 рр. з дня публікації). **Методика.** У ході дослідження був виконаний огляд патентів (зарубіжних і вітчизняних) в області ССНВАС у пасажирських транспортних засобах, зокрема таких, як залізничні вагони, їх оптимізації та способів управління ними. Патентний пошук проведено за певними пошуковими критеріями: ключовими словами, часовими рамками та в різних патентних системах світу. Використано міждисциплінарний підхід. **Результати.** За підсумками пошуку знайдено 157 патентів, із яких вибрано для аналізу 21 документ. Патенти систематизовані в три групи: «Нові технічні та технологічні рішення у системах і засобах функціонування HVAC», «Нові та удосконалені рішення для управління системою HVAC в транспортному засобі», «Озонування повітря в пасажирських вагонах». Встановлено, що всі патенти одним із аспектів мають вирішення питань більш екологічного, енергоефективного та безпечного застосування систем ССНВАС на залізничному транспорті. **Наукова новизна.** Доведено високий рівень проникнення зв'язків між різними технічними областями, до яких відносяться патенти з ССНВАС. Встановлено, що для них характерним є призначення більшості патентних рішень для використання не в суто залізничній галузі, а взагалі на транспорті. **Практична значимість.** Підтвердження високого рівня проникнення зв'язків між різними технічними областями дозволить відображати наявність технічних проблем із ССНВАС та технологій їх вирішення в усьому світі. Це сприятиме більш інтенсивному технологічному підйому в удосконаленні систем життєзабезпечення пасажирського рухомого складу.

Ключові слова: пасажирський рухомий склад; залізничний вагон; патент; система клімат-комфарту; опалення, вентиляція та кондиціонування повітря; HVAC

Вступ

Рівень комфортності проїзду пасажирів на залізничному транспортному засобі в багатьох випадках залежить від мікроклімату салону вагона. Саме параметри мікроклімату (температура, вологість, хімічний склад повітря, фізіологічні показники – вміст мікробів, мікроорганізмів, пилу) безпосередньо впливають на самопочуття пасажирів, суб'єктивне сприйняття ними тривалості подорожі та, врешті-решт, прийняття ними позитивного рішення щодо подальшого користування даним видом транс-

порту або певним маршрутом.

Комфортні умови та зручність проїзду пасажирів також є одним із критеріїв класифікації залізничних вагонів пасажирського парку: спальні, купейні чи некупейні (відкритого типу), із кріслами чи жорсткими місцями для сидіння. Удосконалення основних систем життєзабезпечення, в т. ч. забезпечення параметрів якісного мікроклімату у вагоні, знаходяться у фокусі уваги дослідників світу.

Система клімат-комфарту, опалення, вентиляції та кондиціонування повітря має загальновідому міжнародну аббревіатуру – ССНВАС

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

(акронім від англ. Climate Comfort, Heating, Ventilation and Air Conditioning). При цьому опалення, вентиляція та кондиціонування (ОВК) повітря – це технології підтримки в заданих межах параметрів повітря: температури, вологості та хімічного складу у внутрішніх приміщеннях і салонах транспортного засобу (HVAC – <https://en.wikipedia.org/wiki/HVAC>).

Наприклад, кондиціонований простір включає в себе будь-який простір, який повинен мати регульоване змінне середовище (температуру, вологість, якість повітря та ін.). Умовний простір може бути й у вагоні залізничного транспортного засобу. Показники температури, вологості, якості повітря та інші параметри умовного простору можна контролювати, наприклад, для комфорту пасажирів (клімат-контроль). Але не варто забувати, що зовсім недавно система кондиціонування вважалася найбільш неефективною в плані енергозбереження та однією з найбільш дорогих систем [2].

Багато країн вважають за доцільне проводити модернізацію старих вагонів, де системи кондиціонування взагалі не існувало (це переважно жорсткі вагони відкритого типу, які й перевозять основну масу пасажирів) [5, 17, 28]. Витрати на модернізацію одного старого вагона виявляються приблизно втричі нижчими, ніж на будівництво нового [11].

На сьогодні у ВАТ «Федеральная Пассажирская Компания» (Росія) налічується близько 22,8 тис. вагонів, із них системою кондиціонування повітря (ВКВ) обладнані понад 12 тис., тобто трохи більше половини (53 %) парку [2].

Слід зазначити, що термін служби більшості пасажирських вагонів, які експлуатуються на українських залізницях, вже закінчується, бо більша їх частина побудована у 70-80 рр. ХХ століття. До того ж, аналіз ефективності рухомого складу свідчить не лише про знос, але й про те, що він є технічно, конструктивно і морально застарілий, оскільки основна частина вагонів побудована згідно з технічними вимогами 60-70 рр. минулого століття [6]. За умов обмеженого фінансування виконання відновлювальних ремонтів вагоноремонтними заводами й залізницями актуальним є завдання оснащення вагонів після модернізації сучасними системами життєзабезпечення [11, 13]. При цьому схемні рішення та підходи до забезпе-

чення комфортних умов для пасажирів можуть бути реалізовані у вже існуючому парку пасажирських вагонів і не вимагають істотного переобладнання вже встановлених систем [9]. Одночасно з цим вчені, визнаючи, що існуючі системи контролюють температуру, а не тепловий комфорт, пропонують декілька моделей енергоефективного управління комфортом у транспортному засобі [32].

У той же час світові тенденції наукових розвідок у напрямі CCHVAC передбачають принципово нові технічні та технологічні рішення для сучасних високошвидкісних поїздів – від дизайну конструкцій для колективних середовищ до індивідуально контрольованих умов, персоніфікованих мікро-екологічних систем. Це, наприклад, прагнення перейти на природні хладагенти, що надають мінімальний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини [24], активні розробки транспортних систем кондиціонування повітря на вуглекислоту газі (концерни BMW і Daimler) [2]. З метою енергозаощадження при максимально комфортному середовищі розроблені й впроваджуються SMART-технології для пасажирських вагонів електротранспорту Німеччини, а саме – паливних елементів розширеного діапазону НТ-РЕМ, що забезпечать електричну та теплову потужність із високим ступенем ефективності [29]. Пропонується також застосування технології фотовольтаїки (PV) для використання відновлюваних джерел енергії й проведення заходів щодо підвищення комфортності та енергоефективності залізничних транспортних засобів [33]. У системах кондиціонування повітря високошвидкісних поїздів застосування альтернативних хладагентів (наприклад, R1234yf та R1234ze) ґрунтується на дослідженнях щодо оцінки енергозбереження та умов динамічного навантаження (з точки зору температури оточуючого середовища, сонячного випромінювання, швидкості руху поїзда, кількості пасажирів) [24].

Складна економічна ситуація в останні роки змушує винахідників і виробників залізничної техніки підлаштовуватися під ринкові реалії та енергійно шукати інноваційні технічні рішення з удосконалення систем життєзабезпечення пасажирського рухомого складу.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Але, якщо наукометричні дослідження, спрямовані на отримання нових знань щодо розвитку окремих напрямків HVAC на залізничному транспорті, існують [3], то відповідного аналізу патентів, де б висвітлювалися характерні особливості патентних рішень, автором не знайдено.

Мета

Враховуючи вищевикладене, дослідження спрямовано на огляд та аналіз патентів у напрямі опалення, вентиляції та кондиціонування залізничних пасажирських вагонів (хронологічні рамки: 2011-2017 рр. з дня публікації).

Методика

У ході дослідження був проведений огляд патентів (зарубіжних і вітчизняних) в області систем HVAC у пасажирських транспортних засобах, зокрема таких, як залізничні вагони, їх оптимізації та способів управління ними.

На початковому етапі для можливості визначення загального стану світових досліджень у галузі опалення, вентиляції та кондиціонування пасажирських вагонів, автором був проведений патентний пошук (ПП). ПП – це процедура відбору відповідної певному запиту інформації про патенти, яка може здійснюватися за однією або декількома підставами.

Автором був обраний предметний пошук (лексичний і систематичний) за певними ключовими словами й часовими рамками. Крім того, алгоритм роботи з уже отриманими результатами пошуку включав уточнення відомостей шляхом перегляду додаткової інформації (опису, зображень, авторів, що найчастіше зустрічаються в отриманому матеріалі тощо). Потрібно підкреслити, що аналіз цитування патентів не проводився; досліджувалися сучасний стан і тенденції нових техніко-технологічних рішень у напрямку HVAC.

Патентний пошук проводився за різними патентними системами світу: Цифрова патентна бібліотека України, Google-патент (пошук за патентами), FPO, FRESHPatents: New Patents & Technology; Google Академія; Банк патентів: новые изобретения российских изобретателей; Патенты России; FindPatent.ru: Патентный поиск, поиск патентов и изобретений РФ и СССР;

Espacenet: Patent search; Derwent Innovations Index (Web of Science).

Було встановлено глибину патентного пошуку: 2011-2017 рр. з дня публікації. Пошук здійснювався за ключовими словами, які знаходились у назві патенту або його рефераті:

– «**HVAC**» (Heating, Ventilation, & Air Conditioning) + «**Railway (rail*) passenger car**» + «**Carriage**» + «**Coach**» – у міжнародних системах;

– «**ОВК**» (Опалення, вентиляція та кондиціонування) + «**залізничний пасажирський вагон**» – в українській системі;

– «**ОВК**» (Отопление, вентиляция и кондиционирование) + «**железнодорожный пассажирский вагон**» – у російських системах.

У результаті пошуку за даними системами і встановленими пошуковими критеріями було знайдено 157 патентів, із яких вибрано для аналізу **21 патент**.

Слід підкреслити, що для аналізу було використано міждисциплінарний підхід, оскільки в системі клімат-комфورت, опалення, вентиляції та кондиціонування повітря наявні міцні системні зв'язки з, наприклад, новими технічними рішеннями в процесах пасажирських перевезень, конструкціях вагонів, комп'ютерних науках, енергетичних процесах і системах тощо.

Це підтверджується зверненням до Міжнародної патентної класифікації (МПК, англ. International Patent Classification – IPC), що має відображення на сайті WIPO – World Intellectual Property Organization [22].

Наприклад, згідно МПК, патент на винахід «Модульная система кондиционирования воздуха пассажирского вагона» має клас F24F 3/00 [10]. При цьому область «F» – це Mechanical Engineering; Lighting; Heating; Weapons; Blasting (Машинобудування; Освітлення; Опалення; Двигуни і Насоси; Зброя та Боєприпаси; Вибухові роботи). Подальша деталізація вказує, що: F24 – це «Нагрівання; вентиляція; печі та плити»; F24F – це «Кондиціонування повітря; зволоження повітря; вентиляція; використання повітряних потоків для екранування»; F24F 3/00 – це «Системи кондиціонування повітря, в яких первинне кондиціоноване повітря подається від однієї або декількох центральних станцій до розподільних точок в приміщеннях або

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

просторах, де воно може бути вдруге оброблено; пристрої, призначені для таких систем».

Патент «HVAC systems for electrically-powered vehicles» [21] має клас B60 H 1/00 та відноситься до загальних транспортних засобів (B 60 – Vehicles in General), тобто може мати використання як в залізничному, так і автомобільному, водному, авіаційному транспорті.

Враховуючи причинно-наслідкові зв'язки між технічними проблемами та технологіями їх вирішення (включаючи засоби для досягнення цілей, пристроїв та принципів роботи), було прийнято рішення про систематизацію патентів по трьох групах. Такими групами на основі аналізу нових рішень в області систем і способів для функціонування та управління системами HVAC в пасажирських салонах транспортних засобів та їх оптимізації стали (за умовною назвою) наступні групи патентів.

Група «Нові технічні та технологічні рішення у системах і засобах функціонування HVAC». Група об'єднує патенти, які спрямовані (прямо чи опосередковано) в основному на вирішення технічних питань забезпечення необхідних параметрів мікроклімату в салонах вагонів: очищення повітря від пилу і шкідливих газів, охолодження його при високих зовнішніх температурах і підігрівання при низьких; зволоження й осушення, переміщення, змішування й розподілу повітря, а також для регулювання його параметрів та їх контролю.

Патентні документи віднесені до двох класів: 1) до класу «B» – Performing Operations; Transporting (підкласів: B60 Транспортування транспортними засобами взагалі та B61 залізничне транспортування; B01 Фізичні чи хімічні процеси та апарати); 2) до класу «F» – Mechanical Engineering; Lighting; Heating; Weapons; Blasting (підкласів: F24 Опалення й Вентиляція; F25 Охолодження, Комбіновані системи опалення й охолодження, Теплові насоси; F28 Теплообмін взагалі).

Група «Нові та удосконалені рішення для управління системою HVAC в транспортному засобі». Завданням патентів цієї групи є створення загальних та індивідуальних комфортних умов для пасажирів у кліматичній системі транспортного засобу (в т. ч. пасажирському вагоні поїзда), завдяки новим технічним і технологічним рішенням в управлінні систе-

мою HVAC. Група об'єднує патентні документи з управління системами класу «B» – Performing Operations; Transporting та класу «F» – Mechanical Engineering; Lighting; Heating; Weapons; Blasting. Підкласи є аналогічними першій групі.

Група «Озонування повітря в пасажирських вагонах». Ряд патентів, що пов'язані з системами кондиціонування повітря, пропонують обробку повітря іншими способами, ніж шляхом нагріву, охолодження, фільтрації, стерилізації. Це, наприклад, спосіб озонування повітря у замкненому приміщенні, якими є салони/вагони транспортних засобів. Іонізований повітряний потік може, наприклад, доставлятися в кондиціонований повітряний простір HVAC-системою або може генерувати негативні іони самогенерацією з використанням двигуна вентилятора випарника, що особливо актуально для високошвидкісних поїздів (high-speed) [14].

За міжнародною патентною класифікацією патенти цієї групи в основному належать до класу «A» – Human Necessities (людські потреби), підкласу «A61» – Medical or Veterinary Science; Hygiene з подальшою деталізацією «A61L» Methods or Apparatus for... Disinfection, Sterilisation, or Deodorisation of Air.

Результати

В результаті проведення дослідження встановлено, що всі зусилля винахідників, закріплені їх технічними рішеннями, спрямовані на забезпечення підвищення безпеки та комфорту, зменшення негативного впливу на оточуюче середовище, використання відновлюваних джерел енергії, енергоефективність.

Так, наприклад, у роботах українських дослідників [7, 8] розглядається можливість і робляться конкретні пропозиції щодо включення в автономні мережі електропостачання пасажирських вагонів поновлюваних джерел електричної енергії, зокрема вітрогенераторів, сонячних батарей або їх сукупність.

Згідно МПК, до технічних областей, близьких до теми нашого дослідження, належать декілька класів. Це, перш за все, основний клас «B» – Performing Operations; Transporting; а також клас «F» – Mechanical Engineering;

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Lighting; Heating; Weapons; Blasting; клас «А» – Human Necessities; клас «Н» – Electricity.

Група «Нові технічні та технологічні рішення у системах і засобах функціонування HVAC» включає патенти:

1. Vehicle air system with high efficiency filter. No. US 20170056806 A1 (опубліковано 2017.03.02; винахідники Mardall Joseph та Maser Adam). МПК B01D46/42, B01D46/00 [35].

2. HVAC systems for electrically-powered vehicles. No. US 20160355068 A1 (опубліковано 2016.12.08; винахідники Andrew D. Sutherland та Steven M. Myers). МПК B60H1/00, B60L1/02, B60H1/22, B60L1/00 [21].

3. Air distribution box and associated rail vehicle. No. EP 2977288 A1 (опубліковано 2016.01.27; винахідник György Kalman). МПК B60H1/00, B61D27/00 [15].

4. Refrigerant management in a HVAC system. No. US 20140223936 A1 (опубліковано 2014.08.14; винахідники Jonathan Phillip Hartfield, Harry Kenneth Ring, Michael William Groen, Stephen Anthony Kujak, Ronald Maurice Cosby II; США). МПК F28F13/02, F28F13/18, F25B39/02 [31].

5. Carwash hot-water heating system outside winter storehouse. No. CN 205878601 (U) (опубліковано 2017.01.11; винахідники Xue Qiang; Ruan Zhigang; Shui Chunyu; Fan Yinghong; Shen Jun; Hong Wei; Zhou Liming; Yu Xiaoying; Li Peng; КНР). МПК B60S3/04; F24D17/02; F24H4/02; F24H9/20 [16].

6. Powered distribution systems for powered rail vehicles. No. US 8772962 B2 (опубліковано 2014.07.08; винахідник Ajith Kuttannair Kumar). МПК B60L3 / 00 , B60L11 / 02 , B60L1 / 00 , B60L15 / 32 , B60R16 / 03 [30].

7. Система комфортного клімату пасажирського вагона. № UA 70622 U (опубліковано 2012.06.25; винахідники Христян Є. В., Мямлін С. В., Новіков М. М., Трудов С. Б., Габринєць В. О., Титаренко І. В.; Україна). МПК B60H1/00 [9].

8. Система кондиціонування воздуха в купе пасажирського вагона. № RU 2488747 C2 (опубліковано 2013.07.27; винахідники Рожков Андрей Олегович, Олефиренко Андрей Васильевич, Овчинников Виктор Васильевич; РФ). МПК F24F 3/00 [10].

9. Установка кондиционирования воздуха салонов вагонов. № RU 135601 (опубліковано 2013.12.20; винахідники Закатов Алексей Сергеевич, Жаров Антон Андреевич, Старкова Марина Геннадьевна; РФ). МПК B61D [12].

Група «Нові та удосконалені рішення для управління системою HVAC в транспортному засобі» включає патенти:

1. Energy control mechanisms for an electric vehicle. No. US 9352635 B1 (опубліковано 2016.05.31; винахідники Seneca A. Schepmann, Robert Clippard, Tim Stafford; США). МПК B60L11/00, B60L11/18, B60H1/00 [18].

2. EV Multi-Mode Thermal Management System. No. US20160107504 A1 (опубліковано 2016.04.21; винахідник Vincent George Johnston; США). МПК B60H1/00278 [19].

3. Fresh air control for a transport refrigeration unit. No. WO 2015076872 A1 (опубліковано 2015.05.28; винахідники Petr Trutnovsky, Lubos Forejt, Radim Cermak). МПК B60H1/24, B60H1/00 [20].

4. System for operating an air conditioning compressor from alternative sources. No. US 8491274 B2 (опубліковано 2013.07.23; винахідники Taylor, Richard D., Harris, Paul E.; США). МПК F04B49/00; F04B9/14; F25B27/00 [34].

5. Vehicular HVAC control systems and methods. No. US 7918100 B2 (опубліковано 2011.04.05; винахідники David S. Breed, Wendell C. Johnson, Wilbur E. DuVall; США). МПК B60H1/32, F24F11/00, B60H1/00 [36].

6. Модульная система кондиционирования воздуха пассажирского вагона. № RU 2 512 068(13) C2 (опубліковано 2014.04.10; винахідники Рожков Андрей Олегович, Олефиренко Андрей Васильевич, Овчинников Виктор Васильевич; РФ). МПК F24F 3/00 (2006.01) [4].

7. Система керування асинхронним генератором у складі вітроелектротехнічного комплексу. № UA 84633 (опубліковано 2013.04.29; винахідники Щербак Марина Анатоліївна, Бойко Сергій Миколайович, Михайличенко Дмитро Анатолійович, Сінчук Олег Миколайович; Україна). МПК H02P 9/00 [8].

Група «Озонування повітря в пасажирських вагонах» об'єднує патенти:

1. Air cleaner for high-speed railway. KR101037798B1 (опубліковано 2011-05-27; винахідники Old Young Jin, Kim Goo, Kim Woo-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

seop, Kim Sang Soo, Kim Chang-Hoon, Park Chang Young, Yoon Hyun Chul, Choi Gil-yong, Choi Yoo Mi; Korean). МПК A61L9/22 [14].

2. Ion generator device. US9289779B2 (опубліковано 2016-03-22; винахідники Charles Houston Waddell, Joseph Anton Christiansen; отримувач Global Plasma Solutions). МПК A61L9/22, F16M13/02, B03C3/41, H01J37/16, H01J27/02, H01T23/00, H01J37/30, B03C3/011, F02M27/04 [23].

3. Method for using ozone as a disinfectant. EP2051743B1 (опубліковано 2013-04-10; винахідники Nigel Boast, Douglas Heselton, Jim Hudson, Gordon Esplin. = Bulletin 2013/15. EUROPEAN PATENT SPECIFICATION). МПК A61L2/20, A61L2/26, A61L9/015, A61L101/10 [26].

4. Method and device for decontaminating a confined space. WO2017121767A1 (опубліковано 2017-07-20; винахідник Philippe Saroul). МПК A61L2/202 Ozone [25].

5. Method of disinfecting one or more surfaces and/or sterilizing air, and an apparatus for use in the method. US9511163B2 (опубліковано 2016-12-06; винахідник Jimmy Kjølby Larsen, отримувач Jimco A/S). МПК A61L9/20, A61L9/015, A61L2/10, G01N23/00, F24F3/16, A62B7/08, A61L9/12, A61L2/20, A61N5/00, A61L9/04, A61L2/24 [27].

В результаті дослідження також встановлено, що характерним для ССНВАС є призначення більшості патентних рішень для використання не в суто залізничній галузі, а взагалі на транспорті. При цьому до групи «Озонування повітря в пасажирських вагонах», де провідною є тема забезпечення необхідних потреб людини – її здоров'я (А 61 Медична або ветеринарна наука. Гігієна) належать патенти, технічні рішення яких можуть використовуватися взагалі в замкнених приміщеннях (транспортні пасажирські салони, офіси в будівлях, туалети, санітарні кімнати тощо).

Таким чином, можна констатувати, що патентним документам із удосконалення систем життєзабезпечення пасажирського рухомого складу призначаються одночасно різні коди Міжнародної патентної класифікації (МПК; англ. International Patent Classification), бо вони одночасно можуть стосуватися кількох технічних областей і технологій.

На основі цього можна припустити ймовірність високого рівня проникнення зв'язків у різних технічних областях, до яких належать Система клімат-комфарту, опалення, вентиляції і кондиціювання повітря (ССНВАС – Climate Comfort, Heating, Ventilation and Air Conditioning). Саме ці зв'язки можуть відображати наявність технічних проблем у системах життєзабезпечення в усьому світі та визначати технології їх вирішення.

Наукова новизна та практична значимість

Доведено високий рівень проникнення зв'язків у різних технічних областях, до яких відносяться патенти зі ССНВАС. Автором, враховуючи причинно-наслідкові зв'язки між технічними проблемами та технологіями їх вирішення, проаналізовані патенти були систематизовані за трьома групами. Це «Нові технічні та технологічні рішення у системах і засобах функціонування HVAC», «Нові та удосконалені рішення для управління системою HVAC в транспортному засобі», «Озонування повітря в пасажирських вагонах». Встановлено, що характерним для ССНВАС є призначення більшості патентних рішень для використання не в суто залізничній галузі, а взагалі на транспорті.

Підтвердження високого рівня проникнення зв'язків у різних технічних областях дозволить відображати наявність технічних проблем із ССНВАС в усьому світі та презентувати технології їх вирішення. Це сприятиме більш інтенсивному технологічному підйому в удосконаленні систем життєзабезпечення пасажирського рухомого складу.

Висновки

Інноваційний техніко-технологічний підйом на залізничному транспорті неможливий без удосконалених систем клімат-комфарту, опалення, вентиляції та кондиціювання повітря. На основі проведеного дослідження, спрямованого на огляд та аналіз патентів у напрямі опалення, вентиляції та кондиціювання залізничних пасажирських вагонів (2011-2017 рр. із дня публікації), зроблені наступні висновки:

1. Усі патенти одним із аспектів мають вирішення питань більш екологічного, енергое-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

фективного та безпечного застосування систем CCHVAC на залізничному транспорті.

2. Патентні документи з удосконалення систем життєзабезпечення пасажирського рухомого складу одночасно можуть мати різні коди Міжнародної патентної класифікації (англ. International Patent Classification), як такі, що стосуються кількох технічних областей і технологій.

3. Врахування інтересів і переваги кожного пасажера, прагнення до поліпшення користувацького клієнтського досвіду призводять до появи нових рішень в області Climate Comfort, Heating, Ventilation and Air Conditioning не тільки для колективних середовищ, але й до індивідуально контрольованих умов, персоніфікованих мікро-екологічних систем.

4. Патентні рішення передбачають для вже існуючих транспортних засобів створення ро-

зумних систем, які б відслідковували і самостійно оптимізували параметри мікроклімату та рівень використання енергії.

5. Простежується відхід від системи централізованого кондиціонування, в т. ч. за рахунок роздільного контролю прихованих та явних теплонадходжень.

6. Автори патентів пропонують нові підходи й рішення, що засновані на адаптивних системах вентиляції. Перспективним є перехід на адаптивні системи зі змінною витратою повітря, регульовані за фактичною наповнюваністю салонів пасажирами, з індикацією за датчиками присутності або концентрації вуглекислого газу.

7. Одним із головних показників комфорту для пасажирів транспортних засобів є якість повітряного та теплового режимів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Габринєц, В. А. Концепция оптимального по энергозатратам пассажирского вагона с использованием нетрадиционных источников энергии / В. А. Габринєц, И. В. Титаренко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 4 (52). – С. 111–118. doi: 10.15802/stp2014/27326.
2. Киселев, И. Г. О выборе хладагента для климатических установок пассажирского подвижного состава / И. Г. Киселев, М. Ю. Кудрин, В. П. Приймин // Современные технологии транспорта. – 2014. – № 3. – С. 85–90.
3. Колесникова, Т. О. Розвиток напрямку «кондиціонування повітря» на залізничному транспорті: наукометричний аспект / Т. О. Колесникова, О. В. Помінова, С. Р. Колесников // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 7–19. doi: 10.15802/stp2016/74708.
4. Модульная система кондиционирования воздуха пассажирского вагона [Електронний ресурс] : пат. RU 2512068 С2 : МПК F24F3/00 / Рожков А. О., Олефиренко А. В., Овчинников В. В. (Российская Федерация). – № 2512068 ; заявл. 14.02.11 ; опубл. 10.04.14. – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/images/patents/510/2512068/patent-2512068.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
5. Мокроусов, С. Д. Модернизация пассажирского подвижного состава в Великобритании (обзор зарубежной печати) / С. Д. Мокроусов, Б. Г. Цыган, А. Б. Цыган // Вагонный парк. – 2013. – № 11 (80). – С. 52–60.
6. Пономаренко, О. В. Перспективы поліпшення технічного стану вагонного парку на залізницях України / О. В. Пономаренко // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 88–95. doi: 10.15802/stp2017/93162.
7. Синчук, О. Н. Особенности заряда аккумуляторных батарей в составе ветроэнергетического комплекса в условиях пассажирских вагонов [Електронний ресурс] / О. Н. Синчук, С. Н. Бойко, В. С. Дяченко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 9. – Спец. вып. Т. 1 : Силовая электроника и энергоэффективность. – С. 92–97. – Режим доступа: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/14643>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
8. Система керування асинхронним генератором у складі вітроелектротехнічного комплексу [Електронний ресурс] : пат. 84633 Україна : МПК H02P 9/00 / Щербак М. А., Бойко С. М., Михайличенко Д. А., Синчук О. М. (Україна). – № 201305538 ; заявл. 29.04.13 ; опубл. 25.10.13, Бюл. № 20. – Режим доступа: <http://uapatents.com/5-84633-sistema-keruvannya-asinkhronnim-generatorom-u-skladivitroelektrotekhnichnogo-kompleksu.html>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
9. Система комфортного клімату пасажирського вагона [Електронний ресурс] : пат. 70622 Україна : МПК B60H 1/00 / Християн Є. В., Мямлін С. В., Новіков М. М., Трудов С. Б., Габринєць В. О., Титаренко І. В. (Україна). – № u 201111933 ; заявл. 11.10.11 ; опубл. 25.06.12, Бюл. № 12. – Режим доступа:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- <http://uapatents.com/6-70622-sistema-komfortnogo-klimatu-pasazhirskogo-vagona.html>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
10. Система кондиционирования воздуха в купе пассажирского вагона [Електронний ресурс] : пат. RU 2488747 C2 : МПК F24F 3/00 / Рожков А. О., Олефиренко А. В., Овчинников В. В. (Российская Федерация). – № 2011134218/12 ; заявл. 15.08.11 ; опубл. 27.07.13, Бюл. № 21. – Режим доступа: <http://bankpatentov.ru/node/370491>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 11. Труфанова, А. В. Технічне діагностування системи кондиціонування повітря в пасажирських вагонах / А. В. Труфанова, В. В. Шаблій, Я. І. Гавенда // 3б. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2016. – Вип. 164. – С. 118–126.
 12. Установка кондиционирования воздуха салонов вагонов [Електронний ресурс] : пат. RU 135601 : МПК B61D27/00 / Закатов А. С., Жаров А. А., Старкова М. Г. (Российская Федерация). – заявл. 27.09.13 ; опубл. 20.12.13. – Режим доступа: <http://bankpatentov.ru/node/561549>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 13. Хоменко, І. Ю. Використання режиму теплового насоса для опалення плацкартних вагонів, після їх модернізації зі встановленням кондиціонера / І. Ю. Хоменко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 2 (191). – С. 121–124.
 14. Air cleaner for high-speed railway [Електронний ресурс] : Patent KR 101037798 B1 : IPC A61L9/22 / Old Young Jin, Kim Goo, Kim Woo-seop, Kim Sang Soo, Kim Chang-Hoon, Park Chang Young, Yoon Hyun Chul, Choi Gil-yong, Choi Yoo Mi; Korean. – № 20100087660 ; App. Date 07.09.10 ; Pub. Date 27.05.11. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/KR101037798B1/en?q=rail&q=passenger+car&q=HVAC&page=16>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 15. Air distribution box and associated rail vehicle [Електронний ресурс] : Patent EP 2977288 A1 : IPC B60H1/00, B61D27/00 / György Kalman. – № EP20140178247 ; App. Date 24.07.14 ; Pub. Date 27.01.16. – Режим доступа: <https://encrypted.google.com/patents/EP2977288A1?cl=tr>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 16. Carwash hot-water heating system outside winter storehouse [Електронний ресурс] : Patent CN 205878601 U : IPC B60S3/04; F24D17/02; F24H4/02; F24H9/20 / Xue Qiang; Ruan Zhigang; Shui Chunyu; Fan Yinghong; Shen Jun; Hong Wei; Zhou Liming; Yu Xiaoying; Li Peng. – № CN 201620865134 ; App. Date 10.08.16 ; Pub. Date 11.01.17. – Режим доступа: <https://www.google.com/patents/CN205878601U?cl=en&hl=ru>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 17. Cordner, K. Modernization of passenger trains in the UK / K. Cordner // Modern Railways. – 2002. – № 9. – P. 39–42.
 18. Energy control mechanisms for an electric vehicle [Електронний ресурс] : Patent US 9352635 B1 : IPC B60L11/00, B60L11/18, B60H1/00 / Seneca A. Schepmann, Robert Clippard, Tim Stafford. – № US 14/675,200 ; App. Date 31.03.15 ; Pub. Date 31.05.16. – Режим доступа: <https://www.google.com/patents/US9352635>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 19. EV Multi-Mode Thermal Management System [Електронний ресурс] : Patent US 20160107504 A1 : IPC B60H1/00278 / Vincent George Johnston. – № 14/519,448 ; App. Date 21.10.14 ; Pub. Date 21.04.16. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US20160107504A1/en?q=rail&q=passenger+car&q=HVAC&page=29>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 20. Fresh air control for a transport refrigeration unit [Електронний ресурс] : Patent WO 2015076872 A1 : IPC B60H1/24, B60H1/00 / Petr Trutnovsky, Lubos Forejt, Radim Cermak. – № PCT/US2014/040706 ; App. Date 03.06.14 ; Pub. Date 28.05.15. – Режим доступа: <http://www.google.ch/patents/WO2015076872A1?cl=en>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 21. HVAC systems for electrically-powered vehicles [Електронний ресурс] : Patent US 2016/0355068 A1, IPC B60H1/00, B60L1/02, B60H1/22, B60L1/00 / Andrew D. Sutherland, Stevem M. Myers. – № US 14/729,989 ; App. Date 03.06.15 ; Pub. Date 08.12.16. – Режим доступа: <http://www.freepatentsonline.com/20160355068.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 22. International Patent Classification [Електронний ресурс] // World Intellectual Property Organization. – Режим доступа: <http://www.wipo.int/classifications/ipc/ipcpub/?notion=scheme&version=20170101&symbol=none&menulanguage=en&lang=en&viewmode=f&fipcp=no&showdeleted=yes&indexes=no&headings=yes¬es=yes&direction=o2n&initial=A&cwid=none&tree=no&searchmode=smart>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 23. Ion generator device [Електронний ресурс] : Patent US 9289779 B2 : IPC A61L9/22, F16M13/02, B03C3/41, H01J37/16, H01J27/02, H01T23/00, H01J37/30, B03C3/011, F02M27/04 / Charles Houston

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- Waddell, Joseph Anton Christiansen. – № US 14/480,120 ; App. Date 08.09.14 ; Pub. Date 22.03.16. – Режим доступу: <https://www.google.ch/patents/US9289779>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
24. Mastrullo, R. Refrigerant Alternatives for High Speed Train A/C Systems: Energy Savings and Environmental Emissions Evaluation under Variable Ambient Conditions / R. Mastrullo, A. W. Mauro, C. Vellucci // *Energy Procedia*. – 2016. – Vol. 101. – P. 280–287. doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.036.
 25. Method and device for decontaminating a confined space [Електронний ресурс] : Patent WO 2017121767 A1 : IPC A61L2/202 / Philippe Saroul. – № PCT/EP2017/050501 ; App. Date 11.01.17 ; Pub. Date 20.07.17. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/WO2017121767A1/en?q=high-speed&q=trains&q=HVAC&page=14>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 26. Method for using ozone as a disinfectant [Електронний ресурс] : Patent EP 2051743 B1 : IPC A61L2/20, A61L2/26, A61L9/015, A61L101/10 / Nigel Boast, Douglas Heselton, Jim Hudson, Gordon Esplin. – № 07785025.3 ; App. Date 02.08.07 ; Pub. Date 10.04.13, Bull. № 2013/15 – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/EP2051743B1/en?q=high-speed&q=trains&q=HVAC&page=14>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 27. Method of disinfecting one or more surfaces and/or sterilizing air, and an apparatus for use in the method [Електронний ресурс] : Patent US 9511163 B2 : IPC A61L9/20, A61L9/015, A61L2/10, G01N23/00, F24F3/16, A62B7/08, A61L9/12, A61L2/20, A61N5/00, A61L9/04, A61L2/24 / Jimmy Kjølby Larsen. – № US 14/436,318 ; App. Date 19.10.12 ; Pub. Date 06.12.16. – Режим доступу: <https://www.google.com/patents/US9511163#classifications>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 28. Modernization of passenger cars with the replacement of the body // *International Railway Journal*. – 1998. – No. 10. – P. 58.
 29. Philipps, F. Thermal, Power and Packaging Design of an HT-PEM Fuel Cell Application for Climatization and Range Extension in Future Vehicle Concepts / Franz Philipps // 2015 International Conference on Sustainable Mobility, Applications, Renewables and Technology (SMART) (23–25 Nov. 2015). doi: 10.1109/SMART.2015.
 30. Powered distribution systems for powered rail vehicles [Електронний ресурс] : Patent US 8772962 B2 : IPC B60L3/00, B60L11/02, B60L1/00, B60L15/32, B60R16/03 / Ajith Kuttannair Kumar. – № US 13/800,393 ; App. Date 13.03.13 ; Pub. Date 08.07.14. – Режим доступу: <https://www.google.com/patents/US8772962>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 31. Refrigerant management in a HVAC system [Електронний ресурс] : Patent US 20140223936 A1 : IPC F28F13/02, F28F13/18, F25B39/02 / Jonathan Phillip Hartfield, Harry Kenneth Ring, Michael William Groen, Stephen Anthony Kujak, Ronald Maurice Cosby II. – № US 14/347,521 ; App. Date 26.09.12 ; Pub. Date 14.08.14. – Режим доступу: <https://www.google.com/patents/US20140223936>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 32. Reinforcement learning-based thermal comfort control for vehicle cabins [Електронний ресурс] / James Brusey, Diana Hintea, Elena Gaura, Neil Beloe // *Mechatronics*. – 2017. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 33. Study on the feasibility of solar powered railway system for light weight urban transport [Електронний ресурс] / S. H. Jaffery, H. A. Khan, M. Khan and S. Ali // *Proc. World Renewable Energy Forum*. – 2012. – P. 1892–1896. – Режим доступу: https://ases.conferenceservices.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0039_full%20paper.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 34. System for operating an air conditioning compressor from alternative sources [Електронний ресурс] : Patent US 8491274 B2 : IPC F04B49/00; F04B9/14; F25B27/00 / Taylor, Richard D., Harris, Paul E. – Pub. Date 23.07.13. – Режим доступу: <http://www.freepatentsonline.com/8491274.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 35. Vehicle air system with high efficiency filter [Електронний ресурс] : Patent US 20170056806 A1 : IPC B01D46/42, B01D46/00 / Mardall Joseph, Maser Adam. – № US 14/836,852 ; App. Date 03.06.15 ; Pub. Date 02.03.17. – Режим доступу: <https://www.google.com/patents/US20170056806>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.
 36. Vehicular HVAC control systems and methods [Електронний ресурс] : Patent US 7918100 B2 : IPC B60H1/32, F24F11/00, B60H1/00 / David S. Breed, Wendell C. Johnson, Wilbur E. DuVall. – № US 11/550,926 ; App. Date 19.10.06 ; Pub. Date 05.04.11. – Режим доступу: <http://www.google.ch/patents/US7918100>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.01.2018.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

С. Р. КОЛЕСНИКОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 375 15 71, эл. почта ser.koles13@gmail.com, ORCID 0000-0002-0487-9257

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА: ОБЗОР ПАТЕНТОВ

Цель. Совершенствования основных систем жизнеобеспечения, в т. ч. обеспечение параметров качественного микроклимата в вагоне подвижного состава, находятся в фокусе внимания изобретателей и исследователей мира. Исследование направлено на обзор и анализ патентов в сфере системы климат-комфорта, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (CCHVAC) железнодорожных пассажирских вагонов (хронологические рамки: 2011-2017 гг. со дня публикации). **Методика.** В ходе исследования был проведен обзор патентов (зарубежных и отечественных) в области CCHVAC в пассажирских транспортных средствах, в частности таких, как железнодорожные вагоны, их оптимизации и способов управления ими. Патентный поиск производился по определенным поисковым критериям: ключевым словам, временным рамкам и в различных патентных системах мира. Использован междисциплинарный подход. **Результаты.** По итогам поиска найдено 157 патентов, из которых выбрано для анализа 21 документ. Патенты систематизированы в три группы: «Новые технические и технологические решения в системах и средствах функционирования HVAC», «Новые и усовершенствованные решения для управления системой HVAC в транспортном средстве», «Озонирование воздуха в пассажирских вагонах». Установлено, что все патенты одним из аспектов имеют решения вопросов более экологичного, энергоэффективного и безопасного применения систем CCHVAC на железнодорожном транспорте. **Научная новизна.** Доказан высокий уровень проникновения связей в различных технических областях, к которым относятся патенты по CCHVAC. Установлено, что для них характерным является назначение большинства патентных решений для использования не в сугубо железнодорожной отрасли, а вообще на транспорте. **Практическая значимость.** Подтверждение высокого уровня проникновения связей в различных технических областях позволит отражать наличие технических проблем по CCHVAC и технологий их решения во всем мире. Это будет способствовать более интенсивному технологическому подъему в совершенствовании систем жизнеобеспечения пассажирского подвижного состава.

Ключевые слова: пассажирский подвижной состав; железнодорожный вагон; патент; система климат-комфорта; отопление, вентиляция и кондиционирование; HVAC

S. R. KOLESNYKOV^{1*}

^{1*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 375 15 71, e-mail ser.koles13@gmail.com, ORCID 0000-0002-0487-9257

IMPROVEMENT OF LIFE SUPPORT SYSTEMS OF PASSENGER ROLLING STOCK: PATENT REVIEW

Purpose. Inventors and researchers of the world are focused on improvements of basic life support systems including provision of quality microclimate parameters in a car of the rolling stock. The research is aimed at reviewing and analyzing patents in the field of climate comfort, heating, ventilation and air conditioning (CCHVAC) of railway passenger cars (the chronological framework: 2011-2017 from the date of publication). **Methodology.** During the study there were reviewed patents (foreign and domestic ones) in the field of CCHVAC in passenger vehicles, in particular railway cars, their optimization and ways of managing them. Patent search was carried out according to certain search criteria: keywords, time frames and in various patent systems of the world. An interdisciplinary approach was used. **Findings.** Based on the search results, 157 patents were found, 21 documents of which were selected for analysis. Patents are systematized into three groups: "New technical and technological solutions in systems and functioning facilities of HVAC", "New and improved solutions for HVAC system management in a vehicle", "Air ozonation in passenger cars". It is established that all patents have one of the aspects

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

that have solutions to the issues of more environmentally friendly, energy efficient and safe application of CCHVAC systems in railway transport. **Originality.** It was proved a high level of link penetration in various technical fields, which include patents with CCHVAC. It is established that it is characteristic for them to designate the majority of patent solutions for use not in the purely railway industry, but in transport in general. **Practical value.** Confirmation of the high level of link penetration in various technical fields will make it possible to reflect technical problems with CCHVAC and technologies for their solution throughout the world. This will contribute to a more intensive technological upgrade in the improvement of life support systems for passenger rolling stock.

Key words: passenger rolling stock; railway car; patent; climate-comfort system; heating, ventilation and air conditioning; HVAC

REFERENCE

1. Gabrinets, V. A., & Tytarenko, I. V. (2014). Concept of the minimum energy passenger car with use of unconventional energy sources. *Science and Transport Progress*, 4(52), 111-118. doi: 10.15802/stp2014/27326. (in Russian)
2. Kiselev, I. G., Kudrin, M. Y., & Priymin, V. P. (2014). O vybere khladagenta dlya klimaticheskikh ustanovok passazhirskogo podvizhnogo sostava. *Sovremennye tekhnologii transportu*, 3, 85-90. (in Russian)
3. Kolesnykova, T. O., Pominova, O. V., & Kolesnykov, S. R. (2016). Obtaining of new knowledge in concerning «air conditioning» at the railway transport: scientometric aspect. *Science and Transport Progress*, 3(63), 7-19. doi: 10.15802/stp2016/74708. (in Ukrainian)
4. Rozhkov, A.O., Olefirenko, A.V., & Ovchinnikov, V.V. (2014). *RU Patent No. 2512068*. Moscow: Federalnaya sluzhba po intellektualnoy sobstvennosti Retrieved from <http://www.freepatent.ru/images/patents/510/2512068/patent-2512068.pdf>. (in Russian)
5. Mokrousov, S. D., Tsygan, B. G., & Tsygan, A. B. (2013). Modernizatsiya passazhirskogo podvizhnogo sostava v Velikobritanii (obzor zarubezhnoy pechati). *Car Fleet*, 11(80), 52-60. (in Russian)
6. Ponomarenko, O. V. (2017). The prospects for improving the technical state of rolling stock on the railways of Ukraine. *Science and Transport Progress*, 1(67), 88-95. doi: 10.15802/stp2017/93162. (in Ukrainian)
7. Sinchuk, O. N., Boyko, S. N., & Dyachenko, V. S. (2014). Osobennosti zaryada akkumulyatornykh batarey v sostave vetroenergeticheskogo kompleksa v usloviyakh passazhirskikh vagonov. *Energy saving. Power engineering. Energy audit. Spetsialnyy vypusk: Silovaya elektronika i energoeffektivnost*, 9(1), 92-97. Retrieved from <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/14643>. (in Russian)
8. Shcherbak, M.A., Boiko, S.M., Mykhailchenko, D.A., & Sinchuk, O.M. (2013). *UA Patent No. 84633*. Kyiv: Derzhavnyi departament intelektualnoi vlasnosti. Retrieved from <http://uapatents.com/5-84633-sistema-keruvannya-asinkhronnim-generatorom-u-skladi-vitroelektrotekhnichnogo-kompleksu.html>. (in Ukrainian)
9. Khrystian, Y. V., Myamlin, S. V., Novikov, M. M., Trudov, S. B., Habrynets, V. O., & Tytarenko, I. V. (2012). *UA Patent No. 70622*. Kyiv: Derzhavnyi departament intelektualnoi vlasnosti. Retrieved from <http://uapatents.com/6-70622-sistema-komfortnogo-klimatu-pasazhirskogo-vagona.html>. (in Ukrainian)
10. Rozhkov, A. O., Olefirenko, A. V., & Ovchinnikov, V. V. (2013). *RU Patent No. 2488747*. Moscow: Federalnaya sluzhba po intellektualnoy sobstvennosti. Retrieved from <http://bankpatentov.ru/node/370491>. (in Russian)
11. Trufanova, A. V., Shablii, V. V., & Havenda, Y. I. (2016). Tekhnichne diahnostuvannya systemy kondytsinuvannya povitria v pasazhyrskykh vahonakh. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 164, 118-126. (in Ukrainian)
12. Zakatov, A. S., Zharov, A. A., & Starkova, M. G. (2013). *RU Patent No. 135601*. Moscow: Federalnaya sluzhba po intellektualnoy sobstvennosti. Retrieved from <http://bankpatentov.ru/node/561549>. (in Russian)
13. Khomenko, I. Y. (2013). Vykorystannya rezhymu teplovoho nasosa dlia opalennia platskartnykh vahoniv, pislia yikh modernizatsii zi vstanovlenniam kondytsionera. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2(191), 121-124. (in Ukrainian)
14. Old Young Jin, Kim Goo, Kim Woo-seop, Kim Sang Soo, Kim Chang-Hoon, Park Chang Young, ... Choi Yoo Mi (2011). *Patent KR 101037798 B1*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/KR101037798B1/en?q=rail&q=passenger+car&q=HVAC&page=16>. (in English)
15. Kalman, G. (2016). *Patent EP 2977288 A1*. Retrieved from <https://encrypted.google.com/patents/EP2977288A1?cl=tr>. (in English)
16. Xue Qiang, Ruan Zhigang, Shui Chunyu, Fan Yinghong, Shen Jun, Hong Wei, ... Li Peng. (2017). *Patent CN 205878601 U*. Retrieved from <https://www.google.com/patents/CN205878601U?cl=en&hl=ru>. (in English)
17. Cordner, K. (2002). Modernization of passenger trains in the UK. *Modern Railways*, 9, 39-42.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

18. Seneca A. Schepmann, Robert Clippard, & Tim Stafford (2016). *PatentUS 9352635 B1*. Retrieved from: <https://www.google.com/patents/US9352635>. (in English)
19. Vincent George Johnston (2016). *Patent US 20160107504 A1*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20160107504A1/en?q=rail&q=passenger+car&q=HVAC&page=29>. (in English)
20. Petr Trutnovsky, Lubos Forejt, & Radim Cermak (2015). *Patent WO 2015076872 A1*. Retrieved from <http://www.google.ch/patents/WO2015076872A1?cl=en>. (in English)
21. Andrew D. Sutherland, & Stevem M. Myers (2016). *Patent US 2016/0355068 A1*. Retrieved from <http://www.freepatentsonline.com/20160355068.pdf>. (in English)
22. International Patent Classification. *World Intellectual Property Organization*. Retrieved from <http://www.wipo.int/classifications/ipc/ipcpub/?notion=scheme&version=20170101&symbol=none&menulanguage=en&lang=en&viewmode=f&fipcp=no&showdeleted=yes&indexes=no&headings=yes¬es=yes&direction=o2n&initial=A&cwid=none&tree=no&searchmode=smart>. (in English)
23. Charles Houston Waddell, & Joseph Anton Christiansen (2016). *Patent US 9289779 B2*. Retrieved from <https://www.google.ch/patents/US9289779>. (in English)
24. Mastrullo, R., Mauro, A.W., & Vellucci, C. (2016). Refrigerant Alternatives for High Speed Train A/C Systems: Energy Savings and Environmental Emissions Evaluation under Variable Ambient Conditions. *Energy Procedia*, 101, 280-287. doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.036. (in English)
25. Saroul, P. (2017). *Patent WO 2017121767 A1*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/WO2017121767A1/en?q=high-speed&q=trains&q=HVAC&page=14>. (in English)
26. Boast, N., Heselton, D., Hudson, J., & Esplin, G. (2013). *Patent EP 2051743 B1*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/EP2051743B1/en?q=high-speed&q=trains&q=HVAC&page=14>. (in English)
27. Larsen, J. K. (2016). *Patent US 9511163 B2*. Retrieved from <https://www.google.com/patents/US9511163#classifications>. (in English)
28. Modernization of passenger cars with the replacement of the body. (1998). *International Railway Journal*, 10, 58. (in English)
29. Philipps, F. (2015). Thermal, Power and Packaging Design of an HT-PEM Fuel Cell Application for Climatization and Range Extension in Future Vehicle Concepts. In. *2015 International Conference on Sustainable Mobility, Applications, Renewables and Technology (SMART)*. doi: 10.1109/SMART.2015. (in English)
30. Ajith Kuttannair Kumar (2014). *Patent US 8772962 B2*. Retrieved from <https://www.google.com/patents/US8772962>. (in English)
31. Jonathan Phillip Hartfield, Harry Kenneth Ring, Michael William Groen, Stephen Anthony Kujak, & Ronald Maurice Cosby II (2014). *Patent US 20140223936 A1*. Retrieved from <https://www.google.com/patents/US20140223936>. (in English)
32. Brusey, J., Hintea, D., Hintea, E., & Beloe, N. (2017). Reinforcement learning-based thermal comfort control for vehicle cabins. *Mechatronics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics>. (in English)
33. Jaffery, S. H., Khan, H. A., Khan, M., & Ali, S. (2012). Study on the feasibility of solar powered railway system for light weight urban transport. *Proc. World Renewable Energy Forum*. 1892-1896. Retrieved from https://ases.conferenceservices.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0039_full%20paper.pdf. (in English)
34. Taylor, Richard D., & Harris, Paul E. (2013). *Patent US 8491274 B2*. Retrieved from <http://www.freepatentsonline.com/8491274.pdf>. (in English)
35. Mardall Joseph, & Maser Adam (2017). *Patent US 20170056806 A1*. Retrieved from <https://www.google.com/patents/US20170056806>. (in English)
36. David S. Breed, Wendell C. Johnson, & Wilbur E. DuVall (2011). *Patent US 7918100 B2*. Retrieved from <http://www.google.ch/patents/US7918100>. (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. О. Габрінцем (Україна)

Надійшла до редколегії: 09.10.2017

Прийнята до друку: 16.01.2018

УДК 625.032:629.424.015.2

С. А. КОСТРИЦЯ^{1*}, Ю. Г. СОБОЛЕВСЬКА^{2*}, А. Я. КУЗИШИН^{3*}, А. В. БАТІГ^{4*}

^{1*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 11, ел. пошта kossa571@gmail.com, ORCID 0000-0002-7922-0975

^{2*}Каф. «Фундаментальні дисципліни», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Львівська філія), вул. І. Блажкевича, 12-а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта sobolevskyu@gmail.com, ORCID 0000-0002-8087-2014

^{3*}Лаб. «Залізнично-транспортні дослідження», Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, вул. Липинського, 54, Львів, Україна, 79024, тел. +38 (032) 231 76 13, ел. пошта kuzyshyn1993@gmail.com, ORCID 0000-0002-3012-5395

^{4*}Лаб. «Залізнично-транспортні дослідження», Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, вул. Липинського, 54, Львів, Україна, 79024, тел. +38 (032) 231 76 13, ел. пошта batigasha1992@gmail.com, ORCID 0000-0003-1205-6004

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВАГОНА ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ДПКр-2

Мета. У науковій роботі на основі механічної моделі вагона дизель-поїзда ДПКр-2 виробництва Крюківського вагонобудівного заводу потрібно побудувати математичну модель для вивчення динамічних явищ, які виникають при русі рухомого складу по рейковій колії як на прямих, так і на кривих ділянках. **Методика.** Для побудови математичної моделі складається система з 38 диференціальних рівнянь руху дизель-поїзда. При використанні в центральному ресорному підвішуванні пневматичної ресори її еквівалентна механічна модель представляється у вигляді вузла Кельвіна-Фойгта, який включає у себе паралельно розташований пружний елемент та елемент в'язкого тертя. Податливість рейкової колії враховується пружним та дисипативним елементами. При моделюванні приймалось, що колісна пара та взаємодіюча з нею маса колії рухаються безвідривно. В якості збурювання при дослідженні вимушених вертикальних та горизонтальних коливань прийняті геометричні нерівності лівої та правої рейок. **Результати.** На основі прийнятої механічної моделі вагона дизель-поїзда було побудовано математичну модель, яка складається з 38 диференціальних рівнянь руху. **Наукова новизна.** Вперше для вагона дизель-поїзда ДПКр-2 була розроблена його просторова математична модель із урахуванням особливостей взаємодії окремих елементів конструкції та можливості просадки рейкової колії. При побудові математичної моделі було запропоновано враховувати податливість рейкової колії пружним та дисипативним елементами. **Практична значимість.** Математична модель вагона дизель-поїзда буде використовуватися для вивчення динамічних явищ та визначення динамічних навантажень елементів конструкції у процесі експлуатації. Вивчення цих явищ необхідно для оптимального вибору схеми та параметрів обладнання рухомого складу, зокрема віброзахисних пристроїв (ресорного підвішування, горизонтальних, поздовжніх та поперечних зв'язків колісних пар із рамою візка, візка з кузовом), а також для зменшення динамічних сил, діючих на елементи конструкції рухомого складу та рейкову колію.

Ключові слова: математична модель; дизель-поїзд; система диференціальних рівнянь; пневматична ресора; ресорне підвішування

Вступ

Внаслідок взаємодії ходових частин із верхньою будовою колії у процесі експлуатації рухомого складу виникають взаємні переміщення елементів конструкції дизель-поїзда, а також динамічні сили та моменти, величини яких необхідно знати для забезпечення комфортних умов перевезення пасажирів та їх безпеки [1, 6].

Зусилля, що виникають, у значній мірі залежать від конструкції рухомого складу, стану його ходових частин та верхньої будови колії [8–11].

Основне завдання дослідження динамічних процесів у системі «рухомий склад–колія» полягає у визначенні оптимальних значень параметрів цієї системи, при яких значно знижуються амплітуди коливань і динамічні сили. Під параметрами розуміють габаритні розміри, маси, жорсткості в'язей. Для визначення оптимальних параметрів необхідно дослідити коливальні процеси рухомого складу і його окремих частин, встановити критерії для оцінки плавності ходу, стійкості проти сходження з рейок, вібрації елементів [12]. З точки зору динаміки

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

механічна частина рухомого складу повинна відповідати таким вимогам:

- забезпечувати стійкість руху екіпажу;
- забезпечувати виконання умов міцності елементів екіпажу;
- відповідати вимогам до якості механічної частини.

В роботі [5] була запропонована просторова механічна модель (розрахункова схема) дизель-поїзда, яка враховує основні властивості досліджуваного об'єкта.

Мета

На основі механічної моделі вагона (у вигляді вузла Кельвіна-Фойгта) дизель-поїзда

ДПКр-2 виробництва Крюківського вагонобудівного заводу побудувати його математичну модель для вивчення динамічних явищ, які виникають при русі рухомого складу по рейковій колії як на прямих, так і на кривих ділянках.

Методика

Об'єктом дослідження є вагон пасажирського дизель-поїзда ДПКр-2 виробництва Крюківського вагонобудівного заводу. Методом математичного моделювання на основі прийнятої розрахункової схеми необхідно побудувати модель руху поїзда. Механічна модель вагона дизель-поїзда надається на рис. 1–3.

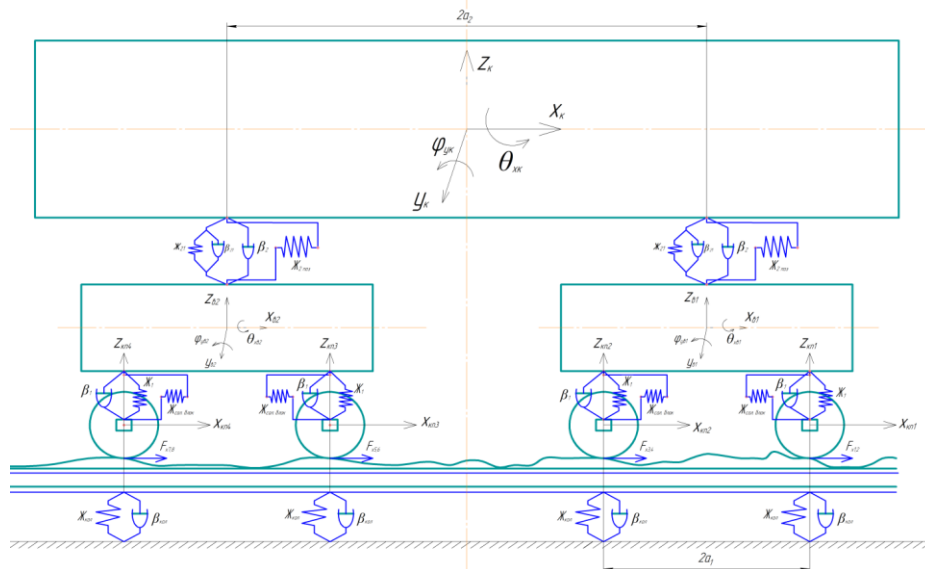


Рис. 1. Механічна модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 в площині ZX

Fig. 1. Mechanical model of the diesel train DTKr-2 car in the plane ZX

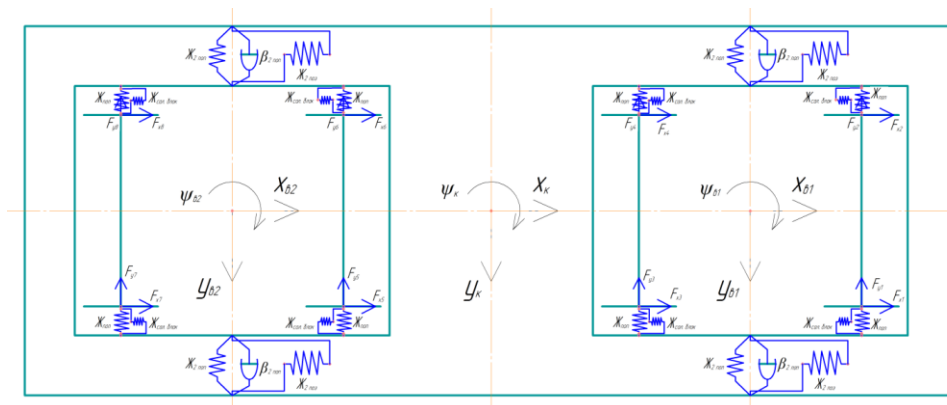


Рис. 2. Механічна модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 в площині YX

Fig. 2. Mechanical model of the diesel train DTKr-2 car in the plane YX

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

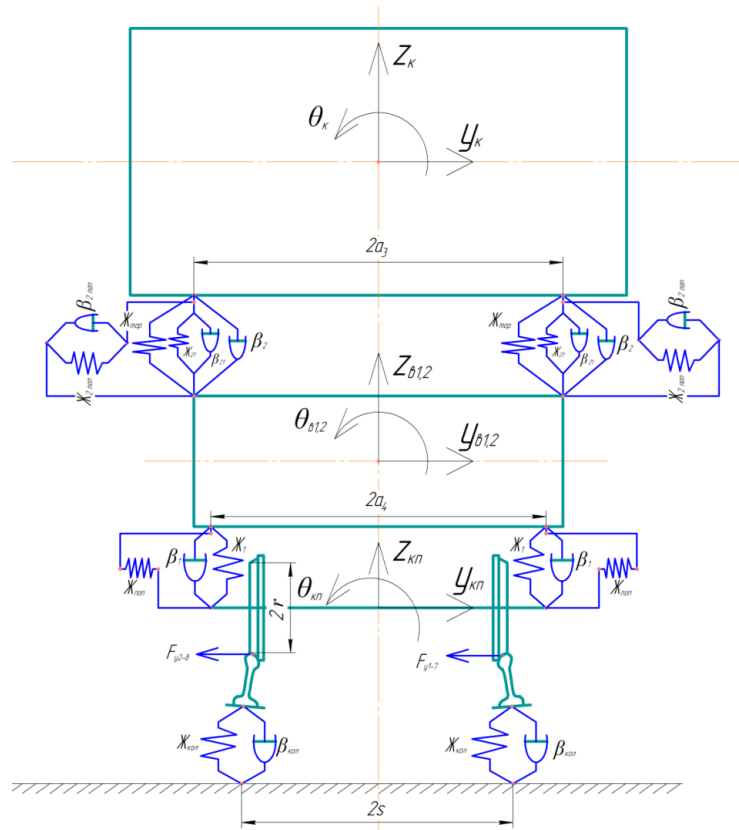


Рис. 3. Механічна модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 в площині ZY

Fig. 3. Mechanical model of the diesel train DTKr-2 car in the plane ZY

Приймаємо наступні припущення:

– кузов, рами візків і колісні пари розглядаються як абсолютно тверді тіла, тому що їх жорсткості значно перевищують жорсткості пружних елементів, що їх з'єднують;

– центри мас цих твердих тіл співпадають із їх геометричними центрами;

– розглядаються коливання підстрибування, бокового виносу, посмикування, галопування, бокового хитання, вилання;

– величини жорсткостей і коефіцієнтів згасання рахуються однаковими для відповідних елементів ресорного підвішування різних візків і колісних пар;

– пружні і дисипативні сили вважаються діючими по осі відповідного пружного і дисипативного елемента;

– пружина і паралельний їй гідравлічний гасник коливань вважаються закріпленими в одній точці [4, 7];

– не враховується жорсткість контакту «колесо–рейка»;

– колісна пара та взаємодіюча з нею маса колії рухаються безвідривно;

– як причини збурювання прийняті геометричні нерівності лівої і правої рейки.

Із наведених трьох проекцій механічної схеми видно, що коливання прийнятої для дослідження моделі вагона дизель-поїзда і рейкової колії можуть бути описані наступними узагальненими координатами: підстрибування z_k , посмикування x_k , бокового виносом y_k , галопування φ_k , вилання ψ_k , бокового хитанням θ_k кузова; підстрибування z_{vj} , посмикування x_{vj} , бокового виносу y_{vj} , галопування φ_{vj} , вилання ψ_{vj} , бокового хитання θ_{vj} рам візків ($j=1-2$ номер рами візка); підстрибування z_{kpi} , посмикування x_{kpi} , бокового виносу y_{kpi} , вилання ψ_{kpi} , бокового хитання θ_{kpi} колісних пар ($i=1-4$ – номер колісної пари).

Як зазначено у припущенні, центри рухомих систем координат розташовуються в центрах

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

мас відповідних елементів розрахункової схеми. Враховуючи також припущення, що колісна пара і приведена до неї маса колії рухаються безвіддривно, отримуємо 38 ступенів вільності.

Слід зазначити, що в реальних конструкціях пневматична ресора встановлюється на візок екіпажа, а зверху на неї опирається кузов. Тому в складених рівняннях буде враховано, що оболонку пневматичної ресори деформують коливання кузова z_k і візка z_b .

Запишемо активні пружні сили, діючі на кузов, візки та колісні пари, які виникають у вертикальному, поперечному та поздовжньому напрямках:

$F_{zk\ n} = \mathcal{H}_{21} (z_k \pm a_2 \varphi_{yk} \mp a_3 \theta_k)$ – пружна вертикальна сила, яка виникає при деформації n -ї пневматичної ресори ($n=1-4$) під час коливань кузова;

$F_{zb\ n} = \mathcal{H}_{21} (z_{bj} \mp a_3 \theta_{bj})$ – пружна вертикальна сила, яка виникає при деформації оболонки n -ї пневматичної ресори під час коливань j -го візка;

$F_{yk\ n} = \mathcal{H}_{2\text{поп}} (y_k \pm a_2 \psi_k + a_5 \theta_k)$ – пружна горизонтальна поперечна сила, яка виникає при деформації оболонки n -ї пневматичної ресори під час коливань кузова;

$F_{yb\ n} = \mathcal{H}_{2\text{поп}} (y_{bj} - a_6 \theta_{bj})$ – пружна горизонтальна поперечна сила, яка виникає при деформації оболонки n -ї пневматичної ресори під час коливань j -го візка;

$F_{xk\ n} = \mathcal{H}_{2\text{поз}} (x_k + a_5 \varphi_{yk} \pm a_3 \psi_k)$ – пружна горизонтальна поздовжня сила, яка виникає при деформації оболонки n -ї пневматичної ресори під час коливань кузова;

$F_{xb\ n} = \mathcal{H}_{2\text{поз}} (x_{bj} \pm a_3 \psi_{bj})$ – пружна горизонтальна поздовжня сила, яка виникає при деформації оболонки n -ї пневматичної ресори під час коливань j -го візка;

$F_{zg\ g} = \mathcal{H}_1 (z_{bj} \pm a_1 \varphi_{ybj} \mp a_4 \theta_{bj})$ – пружна вертикальна сила, яка виникає при деформації

g -ї буксової пружини ($g=1-8$) під час коливань j -го візка;

$F_{zki\ g} = \mathcal{H}_1 (z_{kpi} \mp a_4 \theta_{kpi})$ – пружна вертикальна сила, яка виникає при деформації g -ї буксової пружини під час коливань i -ї колісної пари ($i=1-4$);

$F_{xbs\ s} = \mathcal{H}_{\text{сал.блок}} (x_{bj} + a_7 \varphi_{ybj} \pm a_4 \psi_{bj})$ – пружна горизонтальна поздовжня сила, яка виникає при деформації s -го сален-блока ($s=1-8$) під час коливань j -го візка;

$F_{xki\ s} = \mathcal{H}_{\text{сал.блок}} (x_{kpi} \pm a_4 \psi_{kpi})$ – пружна горизонтальна поздовжня сила, яка виникає при деформації s -го сален-блока під час коливань i -ї колісної пари;

$F_{yvg\ g} = \mathcal{H}_{\text{поп}} (y_{bj} \pm a_1 \psi_{bj} + a_7 \theta_{bj})$ – пружна горизонтальна поперечна сила, яка виникає при деформації g -ї буксової пружини ($g=1-8$) від дії коливань j -го візка;

$F_{yki\ g} = \mathcal{H}_{\text{поп}} (y_{kpi})$ – пружна горизонтальна поперечна сила, яка виникає при деформації g -ї буксової пружини під час коливань i -ї колісної пари;

F_x, F_y – поздовжні та поперечні сили кріплення в контакті «колесо–рейка» [2, 3, 14–16].

Для опису коливань під час побудови механічної моделі вагона дизель-поїзда, у центральній ступені ресорного підвищення якого використовуються пневматичні ресори з паралельно до них встановленими гідравлічними гасниками коливань, отримано математичну модель, яка складається з 38 диференціальних рівнянь другого порядку.

Результати

На основі розрахункової схеми була побудована математична модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2.

Дана математична модель виглядає наступним чином:

Кузов

Підстрибування

$$m_k \cdot \ddot{z}_k + 4\beta_{21} \cdot \dot{z}_k + 4\beta_2 \cdot \dot{z}_k + 4\mathcal{H}_{21} \cdot z_k - 2\mathcal{H}_{21} \cdot z_{b1} - 2\mathcal{H}_{21} \cdot z_{b2} - 2\beta_{21} \cdot \dot{z}_{b1} - 2\beta_{21} \cdot \dot{z}_{b2} - 2\beta_2 \cdot \dot{z}_{b1} - 2\beta_2 \cdot \dot{z}_{b2} = 0$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Галопування

$$J_{\text{ук}} \cdot \ddot{\varphi}_{\text{ук}} + 4\beta_{21} \cdot a_2^2 \cdot \dot{\varphi}_{\text{ук}} + 4\beta_2 \cdot a_2^2 \cdot \dot{\varphi}_{\text{ук}} + 4\mathcal{K}_{21} \cdot a_2^2 \cdot \varphi_{\text{ук}} - 2\mathcal{K}_{21} \cdot a_2 \cdot z_{\text{в1}} + 2\mathcal{K}_{21} \cdot a_2 \cdot z_{\text{в2}} - \\ - 2\beta_{21} \cdot a_2 \cdot \dot{z}_{\text{в1}} + 2\beta_{21} \cdot a_2 \cdot \dot{z}_{\text{в2}} - 2\beta_2 \cdot a_2 \cdot \dot{z}_{\text{в1}} + 2\beta_2 \cdot a_2 \cdot \dot{z}_{\text{в2}} + 4\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot a_5 \cdot (x_{\text{к}} + a_5 \cdot \varphi_{\text{ук}}) - \\ - 2\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot a_5 \cdot x_{\text{в1}} - 2\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot a_5 \cdot x_{\text{в2}} = 0$$

Бокове хитання

$$J_{\text{хк}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{к}} + 4\mathcal{K}_{21} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{к}} + 4\beta_{21} \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}} + 4\beta_2 \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}} + 4\mathcal{K}_{\text{тор}} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{к}} + 4\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot a_5 \cdot (y_{\text{к}} + a_5 \cdot \theta_{\text{к}}) + \\ + 4\beta_{2\text{поп}} \cdot a_5 \cdot (\dot{y}_{\text{к}} + a_5 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}}) - 2\mathcal{K}_{21} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{в1}} - 2\mathcal{K}_{21} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{в2}} - 2\beta_{21} \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{в1}} - 2\beta_{21} \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{в2}} - 2\beta_2 \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{в1}} - \\ - 2\beta_2 \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{в2}} - 2\mathcal{K}_{\text{тор}} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{в1}} - 2\mathcal{K}_{\text{тор}} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{в2}} - 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot a_5 \cdot (y_{\text{в1}} - a_6 \cdot \theta_{\text{в1}}) - 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot a_5 \cdot (y_{\text{в2}} - a_6 \cdot \theta_{\text{в2}}) - \\ - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot a_5 \cdot (\dot{y}_{\text{в1}} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{\text{в1}}) - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot a_5 \cdot (\dot{y}_{\text{в2}} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{\text{в2}}) = 0$$

Посмикування

$$m_{\text{к}} \cdot \ddot{x}_{\text{к}} + 4\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot (x_{\text{к}} + a_5 \cdot \varphi_{\text{ук}}) - 2\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot x_{\text{в1}} - 2\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot x_{\text{в2}} = 0$$

Боковий винос

$$m_{\text{к}} \cdot \ddot{y}_{\text{к}} + 4\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot (y_{\text{к}} + a_5 \cdot \theta_{\text{к}}) + 4\beta_{2\text{поп}} \cdot (\dot{y}_{\text{к}} + a_5 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}}) - 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot (y_{\text{в1}} - a_6 \cdot \theta_{\text{в1}}) - 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot (y_{\text{в2}} - a_6 \cdot \theta_{\text{в2}}) - \\ - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot (\dot{y}_{\text{в1}} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{\text{в1}}) - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot (\dot{y}_{\text{в2}} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{\text{в2}}) = 0$$

Вилання

$$J_{\text{зк}} \cdot \ddot{\psi}_{\text{к}} + 4\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot a_2^2 \cdot \psi_{\text{к}} + 4\beta_{2\text{поп}} \cdot a_2^2 \cdot \dot{\psi}_{\text{к}} + 4\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot a_2^2 \cdot \psi_{\text{к}} - 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot a_2 \cdot (y_{\text{в1}} - a_6 \cdot \theta_{\text{в1}}) - \\ - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot a_2 \cdot (\dot{y}_{\text{в1}} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{\text{в1}}) + 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot a_2 \cdot (y_{\text{в2}} - a_6 \cdot \theta_{\text{в2}}) + 2\beta_{2\text{поп}} \cdot a_2 \cdot (\dot{y}_{\text{в2}} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{\text{в2}}) = 0$$

Візки № 1–2

Підстрибування

$$m_{\text{в1}} \cdot \ddot{z}_{\text{в1}} + 4\mathcal{K}_1 \cdot z_{\text{в1}} + 4\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{в1}} + 2\mathcal{K}_{21} \cdot z_{\text{в1}} + 2\beta_{21} \cdot \dot{z}_{\text{в1}} + 2\beta_2 \cdot \dot{z}_{\text{в1}} - 2\mathcal{K}_{21} \cdot (z_{\text{к}} + a_2 \cdot \varphi_{\text{ук}}) - \\ - 2\beta_{21} \cdot (\dot{z}_{\text{к}} + a_2 \cdot \dot{\varphi}_{\text{ук}}) - 2\beta_2 \cdot (\dot{z}_{\text{к}} + a_2 \cdot \dot{\varphi}_{\text{ук}}) - 2\mathcal{K}_1 \cdot z_{\text{кп1}} - 2\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп1}} - 2\mathcal{K}_1 \cdot z_{\text{кп2}} - 2\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп2}} = 0 \\ m_{\text{в2}} \cdot \ddot{z}_{\text{в2}} + 4\mathcal{K}_1 \cdot z_{\text{в2}} + 4\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{в2}} + 2\mathcal{K}_{21} \cdot z_{\text{в2}} + 2\beta_{21} \cdot \dot{z}_{\text{в2}} + 2\beta_2 \cdot \dot{z}_{\text{в2}} - 2\mathcal{K}_{21} \cdot (z_{\text{к}} - a_2 \cdot \varphi_{\text{ук}}) - \\ - 2\beta_{21} \cdot (\dot{z}_{\text{к}} - a_2 \cdot \dot{\varphi}_{\text{ук}}) - 2\beta_2 \cdot (\dot{z}_{\text{к}} - a_2 \cdot \dot{\varphi}_{\text{ук}}) - 2\mathcal{K}_1 \cdot z_{\text{кп3}} - 2\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп3}} - 2\mathcal{K}_1 \cdot z_{\text{кп4}} - 2\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп4}} = 0$$

Посмикування

$$m_{\text{в1}} \cdot \ddot{x}_{\text{в1}} + 2\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot x_{\text{в1}} + 4\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot (x_{\text{в1}} + a_7 \cdot \varphi_{\text{ув1}}) - 2\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot (x_{\text{к}} + a_5 \cdot \varphi_{\text{ук}}) - 2\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot x_{\text{кп1}} - 2\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot x_{\text{кп2}} = 0 \\ m_{\text{в2}} \cdot \ddot{x}_{\text{в2}} + 2\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot x_{\text{в2}} + 4\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot (x_{\text{в2}} + a_7 \cdot \varphi_{\text{ув2}}) - 2\mathcal{K}_{2\text{поз}} \cdot (x_{\text{к}} + a_5 \cdot \varphi_{\text{ук}}) - 2\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot x_{\text{кп3}} - 2\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot x_{\text{кп4}} = 0$$

Боковий винос

$$m_{\text{в1}} \cdot \ddot{y}_{\text{в1}} + 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot (y_{\text{в1}} - a_6 \cdot \theta_{\text{в1}}) + 2\beta_{2\text{поп}} \cdot (\dot{y}_{\text{в1}} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{\text{в1}}) + 4\mathcal{K}_{\text{поп}} \cdot (y_{\text{в1}} + a_7 \cdot \theta_{\text{в1}}) - \\ - 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot (y_{\text{к}} + a_2 \cdot \psi_{\text{к}} + a_5 \cdot \theta_{\text{к}}) - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot (\dot{y}_{\text{к}} + a_2 \cdot \dot{\psi}_{\text{к}} + a_5 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}}) - 2\mathcal{K}_{\text{поп}} \cdot y_{\text{кп1}} - 2\mathcal{K}_{\text{поп}} \cdot y_{\text{кп2}} = 0 \\ m_{\text{в2}} \cdot \ddot{y}_{\text{в2}} + 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot (y_{\text{в2}} - a_6 \cdot \theta_{\text{в2}}) + 2\beta_{2\text{поп}} \cdot (\dot{y}_{\text{в2}} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{\text{в2}}) + 4\mathcal{K}_{\text{поп}} \cdot (y_{\text{в2}} + a_7 \cdot \theta_{\text{в2}}) - \\ - 2\mathcal{K}_{2\text{поп}} \cdot (y_{\text{к}} - a_2 \cdot \psi_{\text{к}} + a_5 \cdot \theta_{\text{к}}) - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot (\dot{y}_{\text{к}} - a_2 \cdot \dot{\psi}_{\text{к}} + a_5 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}}) - 2\mathcal{K}_{\text{поп}} \cdot y_{\text{кп3}} - 2\mathcal{K}_{\text{поп}} \cdot y_{\text{кп4}} = 0$$

Галопування

$$J_{\text{ув1}} \cdot \ddot{\varphi}_{\text{ув1}} + 4\mathcal{K}_1 \cdot a_1^2 \cdot \varphi_{\text{ув1}} + 4\beta_1 \cdot a_1^2 \cdot \dot{\varphi}_{\text{ув1}} + 4\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot a_7 \cdot (x_{\text{в1}} + a_7 \cdot \varphi_{\text{ув1}}) - 2\mathcal{K}_1 \cdot a_1 \cdot z_{\text{кп1}} - \\ - 2\beta_1 \cdot a_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп1}} + 2\mathcal{K}_1 \cdot a_1 \cdot z_{\text{кп2}} + 2\beta_1 \cdot a_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп2}} - 2\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot a_7 \cdot x_{\text{кп1}} - 2\mathcal{K}_{\text{сал.блок}} \cdot a_7 \cdot x_{\text{кп2}} = 0$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$J_{y_{B2}} \cdot \ddot{\varphi}_{y_{B2}} + 4\mathcal{H}_1 \cdot a_1^2 \cdot \varphi_{y_{B2}} + 4\beta_1 \cdot a_1^2 \cdot \dot{\varphi}_{y_{B2}} + 4\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_7 \cdot (x_{B2} + a_7 \cdot \varphi_{y_{B2}}) - 2\mathcal{H}_1 \cdot a_1 \cdot z_{\text{кп3}} - \\ - 2\beta_1 \cdot a_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп3}} + 2\mathcal{H}_1 \cdot a_1 \cdot z_{\text{кп4}} + 2\beta_1 \cdot a_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп4}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_7 \cdot x_{\text{кп3}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_7 \cdot x_{\text{кп4}} = 0$$

Бокове хитання

$$J_{x_{B1}} \cdot \ddot{\theta}_{B1} + 4\mathcal{H}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{B1} + 4\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{B1} + 4\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_7 \cdot (y_{B1} + a_7 \cdot \theta_{B1}) - 2\mathcal{H}_{2\text{поп}} \cdot a_6 \cdot (y_{B1} - a_6 \cdot \theta_{B1}) - \\ - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot a_6 \cdot (\dot{y}_{B1} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{B1}) + 2\mathcal{H}_{\text{тор}} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{B1} + 2\mathcal{H}_{21} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{B1} + 2\beta_{21} \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{B1} + 2\beta_2 \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{B1} - \\ - 2\mathcal{H}_{\text{тор}} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{к}} - 2\mathcal{H}_{21} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{к}} - 2\beta_{21} \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}} - 2\beta_2 \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}} - 2\mathcal{H}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{кп1}} - 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп1}} - \\ - 2\mathcal{H}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{кп2}} - 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп2}} - 2\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_7 \cdot y_{\text{кп1}} - 2\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_7 \cdot y_{\text{кп2}} + \\ + 2\mathcal{H}_{2\text{поп}} \cdot a_6 \cdot (y_{\text{к}} + a_2 \cdot \psi_{\text{к}} + a_5 \cdot \theta_{\text{к}}) + 2\beta_{2\text{поп}} \cdot a_6 \cdot (\dot{y}_{\text{к}} + a_2 \cdot \dot{\psi}_{\text{к}} + a_5 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}}) = 0 \\ J_{x_{B2}} \cdot \ddot{\theta}_{B2} + 4\mathcal{H}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{B2} + 4\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{B2} + 4\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_7 \cdot (y_{B2} + a_7 \cdot \theta_{B2}) - 2\mathcal{H}_{2\text{поп}} \cdot a_6 \cdot (y_{B2} - a_6 \cdot \theta_{B2}) - \\ - 2\beta_{2\text{поп}} \cdot a_6 \cdot (\dot{y}_{B2} - a_6 \cdot \dot{\theta}_{B2}) + 2\mathcal{H}_{\text{тор}} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{B2} + 2\mathcal{H}_{21} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{B2} + 2\beta_{21} \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{B2} + 2\beta_2 \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{B2} - \\ - 2\mathcal{H}_{\text{тор}} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{к}} - 2\mathcal{H}_{21} \cdot a_3^2 \cdot \theta_{\text{к}} - 2\beta_{21} \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}} - 2\beta_2 \cdot a_3^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}} - 2\mathcal{H}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{кп3}} - 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп3}} - \\ - 2\mathcal{H}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{кп4}} - 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп4}} - 2\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_7 \cdot y_{\text{кп3}} - 2\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_7 \cdot y_{\text{кп4}} + \\ + 2\mathcal{H}_{2\text{поп}} \cdot a_6 \cdot (y_{\text{к}} - a_2 \cdot \psi_{\text{к}} + a_5 \cdot \theta_{\text{к}}) + 2\beta_{2\text{поп}} \cdot a_6 \cdot (\dot{y}_{\text{к}} - a_2 \cdot \dot{\psi}_{\text{к}} + a_5 \cdot \dot{\theta}_{\text{к}}) = 0$$

Виявлення

$$J_{z_{B1}} \cdot \ddot{\psi}_{B1} + 2\mathcal{H}_{2\text{поз}} \cdot a_3^2 \cdot \psi_{B1} + 4\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_1^2 \cdot \psi_{B1} + 4\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{B1} - 2\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_1 \cdot y_{\text{кп1}} + \\ + 2\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_1 \cdot y_{\text{кп2}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{кп1}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{кп2}} - 2\mathcal{H}_{2\text{поз}} \cdot a_3^2 \cdot \psi_{\text{к}} = 0 \\ J_{z_{B2}} \cdot \ddot{\psi}_{B2} + 2\mathcal{H}_{2\text{поз}} \cdot a_3^2 \cdot \psi_{B2} + 4\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_1^2 \cdot \psi_{B2} + 4\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{B2} - 2\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_1 \cdot y_{\text{кп3}} + \\ + 2\mathcal{H}_{\text{поп}} \cdot a_1 \cdot y_{\text{кп4}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{кп3}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{кп4}} - 2\mathcal{H}_{2\text{поз}} \cdot a_3^2 \cdot \psi_{\text{к}} = 0$$

Колісна пара №1–4.

Підстрибування

$$(m_{\text{кп1}} + 2m_{\text{кол}}) \cdot \ddot{z}_{\text{кп1}} + 2\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп1}} + 2\beta_{\text{кол}} \cdot \dot{z}_{\text{кп1}} + 2\mathcal{H}_1 \cdot z_{\text{кп1}} + 2\mathcal{H}_{\text{кол}} \cdot z_{\text{кп1}} - 2\mathcal{H}_1 \cdot (z_{B1} + a_1 \cdot \varphi_{y_{B1}}) - \\ - 2\beta_1 \cdot (\dot{z}_{B1} + a_1 \cdot \dot{\varphi}_{y_{B1}}) = m_{\text{кол}} \cdot (\ddot{\eta}_{\text{л1}} + \ddot{\eta}_{\text{пр1}}) + \beta_{\text{кол}} \cdot (\dot{\eta}_{\text{л1}} + \dot{\eta}_{\text{пр1}}) + \mathcal{H}_{\text{кол}} \cdot (\eta_{\text{л1}} + \eta_{\text{пр1}}) \\ (m_{\text{кп2}} + 2m_{\text{кол}}) \cdot \ddot{z}_{\text{кп2}} + 2\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп2}} + 2\beta_{\text{кол}} \cdot \dot{z}_{\text{кп2}} + 2\mathcal{H}_1 \cdot z_{\text{кп2}} + 2\mathcal{H}_{\text{кол}} \cdot z_{\text{кп2}} - 2\mathcal{H}_1 \cdot (z_{B1} - a_1 \cdot \varphi_{y_{B1}}) - \\ - 2\beta_1 \cdot (\dot{z}_{B1} - a_1 \cdot \dot{\varphi}_{y_{B1}}) = m_{\text{кол}} \cdot (\ddot{\eta}_{\text{л2}} + \ddot{\eta}_{\text{пр2}}) + \beta_{\text{кол}} \cdot (\dot{\eta}_{\text{л2}} + \dot{\eta}_{\text{пр2}}) + \mathcal{H}_{\text{кол}} \cdot (\eta_{\text{л2}} + \eta_{\text{пр2}}) \\ (m_{\text{кп3}} + 2m_{\text{кол}}) \cdot \ddot{z}_{\text{кп3}} + 2\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп3}} + 2\beta_{\text{кол}} \cdot \dot{z}_{\text{кп3}} + 2\mathcal{H}_1 \cdot z_{\text{кп3}} + 2\mathcal{H}_{\text{кол}} \cdot z_{\text{кп3}} - 2\mathcal{H}_1 \cdot (z_{B2} + a_1 \cdot \varphi_{y_{B2}}) - \\ - 2\beta_1 \cdot (\dot{z}_{B2} + a_1 \cdot \dot{\varphi}_{y_{B2}}) = m_{\text{кол}} \cdot (\ddot{\eta}_{\text{л3}} + \ddot{\eta}_{\text{пр3}}) + \beta_{\text{кол}} \cdot (\dot{\eta}_{\text{л3}} + \dot{\eta}_{\text{пр3}}) + \mathcal{H}_{\text{кол}} \cdot (\eta_{\text{л3}} + \eta_{\text{пр3}}) \\ (m_{\text{кп4}} + 2m_{\text{кол}}) \cdot \ddot{z}_{\text{кп4}} + 2\beta_1 \cdot \dot{z}_{\text{кп4}} + 2\beta_{\text{кол}} \cdot \dot{z}_{\text{кп4}} + 2\mathcal{H}_1 \cdot z_{\text{кп4}} + 2\mathcal{H}_{\text{кол}} \cdot z_{\text{кп4}} - 2\mathcal{H}_1 \cdot (z_{B2} - a_1 \cdot \varphi_{y_{B2}}) - \\ - 2\beta_1 \cdot (\dot{z}_{B2} - a_1 \cdot \dot{\varphi}_{y_{B2}}) = m_{\text{кол}} \cdot (\ddot{\eta}_{\text{л4}} + \ddot{\eta}_{\text{пр4}}) + \beta_{\text{кол}} \cdot (\dot{\eta}_{\text{л4}} + \dot{\eta}_{\text{пр4}}) + \mathcal{H}_{\text{кол}} \cdot (\eta_{\text{л4}} + \eta_{\text{пр4}})$$

Посмикування

$$m_{\text{кп1}} \cdot \ddot{x}_{\text{кп1}} + 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot x_{\text{кп1}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot (x_{B1} + a_7 \cdot \varphi_{y_{B1}}) = F_{x1} + F_{x2} \\ m_{\text{кп2}} \cdot \ddot{x}_{\text{кп2}} + 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot x_{\text{кп2}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot (x_{B1} + a_7 \cdot \varphi_{y_{B1}}) = F_{x3} + F_{x4} \\ m_{\text{кп3}} \cdot \ddot{x}_{\text{кп3}} + 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot x_{\text{кп3}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot (x_{B2} + a_7 \cdot \varphi_{y_{B2}}) = F_{x5} + F_{x6} \\ m_{\text{кп4}} \cdot \ddot{x}_{\text{кп4}} + 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot x_{\text{кп4}} - 2\mathcal{H}_{\text{сал.блок}} \cdot (x_{B2} + a_7 \cdot \varphi_{y_{B2}}) = F_{x7} + F_{x8}$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Боковий винос

$$\begin{aligned}
(m_{\text{кп1}} + 2m_{\text{кол}}) \cdot \ddot{y}_{\text{кп1}} + 2\mathcal{J}_{\text{поп}} \cdot y_{\text{кп1}} - 2\mathcal{J}_{\text{поп}} \cdot (y_{\text{в1}} + a_1 \cdot \psi_{\text{в1}} + a_7 \cdot \theta_{\text{в1}}) &= -F_{y1} - F_{y2} \\
(m_{\text{кп2}} + 2m_{\text{кол}}) \cdot \ddot{y}_{\text{кп2}} + 2\mathcal{J}_{\text{поп}} \cdot y_{\text{кп2}} - 2\mathcal{J}_{\text{поп}} \cdot (y_{\text{в1}} - a_1 \cdot \psi_{\text{в1}} + a_7 \cdot \theta_{\text{в1}}) &= -F_{y3} - F_{y4} \\
(m_{\text{кп3}} + 2m_{\text{кол}}) \cdot \ddot{y}_{\text{кп3}} + 2\mathcal{J}_{\text{поп}} \cdot y_{\text{кп3}} - 2\mathcal{J}_{\text{поп}} \cdot (y_{\text{в2}} + a_1 \cdot \psi_{\text{в2}} + a_7 \cdot \theta_{\text{в2}}) &= -F_{y5} - F_{y6} \\
(m_{\text{кп4}} + 2m_{\text{кол}}) \cdot \ddot{y}_{\text{кп4}} + 2\mathcal{J}_{\text{поп}} \cdot y_{\text{кп4}} - 2\mathcal{J}_{\text{поп}} \cdot (y_{\text{в2}} - a_1 \cdot \psi_{\text{в2}} + a_7 \cdot \theta_{\text{в2}}) &= -F_{y7} - F_{y8}
\end{aligned}$$

Бокове хитання

$$\begin{aligned}
J_{\text{хкп1}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{кп1}} + 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп1}} + 2\beta_{\text{кол}} \cdot s^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп1}} + 2\mathcal{J}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{кп1}} + 2\mathcal{J}_{\text{кол}} \cdot s^2 \cdot \theta_{\text{кп1}} - 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{в1}} - 2\mathcal{J}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{в1}} &= \\
= \beta_{\text{кол}} \cdot s \cdot (\dot{\eta}_{\text{пр1}} - \dot{\eta}_{\text{л1}}) + \mathcal{J}_{\text{кол}} \cdot s \cdot (\eta_{\text{пр1}} - \eta_{\text{л1}}) - F_{y1} \cdot r_1 - F_{y2} \cdot r_2 \\
J_{\text{хкп2}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{кп2}} + 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп2}} + 2\beta_{\text{кол}} \cdot s^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп2}} + 2\mathcal{J}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{кп2}} + 2\mathcal{J}_{\text{кол}} \cdot s^2 \cdot \theta_{\text{кп2}} - 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{в1}} - 2\mathcal{J}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{в1}} &= \\
= \beta_{\text{кол}} \cdot s \cdot (\dot{\eta}_{\text{пр2}} - \dot{\eta}_{\text{л2}}) + \mathcal{J}_{\text{кол}} \cdot s \cdot (\eta_{\text{пр2}} - \eta_{\text{л2}}) - F_{y3} \cdot r_3 - F_{y4} \cdot r_4 \\
J_{\text{хкп3}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{кп3}} + 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп3}} + 2\beta_{\text{кол}} \cdot s^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп3}} + 2\mathcal{J}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{кп3}} + 2\mathcal{J}_{\text{кол}} \cdot s^2 \cdot \theta_{\text{кп3}} - 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{в2}} - 2\mathcal{J}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{в2}} &= \\
= \beta_{\text{кол}} \cdot s \cdot (\dot{\eta}_{\text{пр3}} - \dot{\eta}_{\text{л3}}) + \mathcal{J}_{\text{кол}} \cdot s \cdot (\eta_{\text{пр3}} - \eta_{\text{л3}}) - F_{y5} \cdot r_5 - F_{y6} \cdot r_6 \\
J_{\text{хкп4}} \cdot \ddot{\theta}_{\text{кп4}} + 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп4}} + 2\beta_{\text{кол}} \cdot s^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{кп4}} + 2\mathcal{J}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{кп4}} + 2\mathcal{J}_{\text{кол}} \cdot s^2 \cdot \theta_{\text{кп4}} - 2\beta_1 \cdot a_4^2 \cdot \dot{\theta}_{\text{в2}} - 2\mathcal{J}_1 \cdot a_4^2 \cdot \theta_{\text{в2}} &= \\
= \beta_{\text{кол}} \cdot s \cdot (\dot{\eta}_{\text{пр4}} - \dot{\eta}_{\text{л4}}) + \mathcal{J}_{\text{кол}} \cdot s \cdot (\eta_{\text{пр4}} - \eta_{\text{л4}}) - F_{y7} \cdot r_7 - F_{y8} \cdot r_8.
\end{aligned}$$

Виявлення

$$\begin{aligned}
J_{\text{зкп1}} \cdot \ddot{\psi}_{\text{кп1}} + 2\mathcal{J}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{кп1}} - 2\mathcal{J}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{в1}} &= (F_{x2} - F_{x1}) \cdot s; \\
J_{\text{зкп2}} \cdot \ddot{\psi}_{\text{кп2}} + 2\mathcal{J}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{кп2}} - 2\mathcal{J}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{в1}} &= (F_{x4} - F_{x3}) \cdot s; \\
J_{\text{зкп3}} \cdot \ddot{\psi}_{\text{кп3}} + 2\mathcal{J}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{кп3}} - 2\mathcal{J}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{в2}} &= (F_{x6} - F_{x5}) \cdot s; \\
J_{\text{зкп4}} \cdot \ddot{\psi}_{\text{кп4}} + 2\mathcal{J}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{кп4}} - 2\mathcal{J}_{\text{сал.блок}} \cdot a_4^2 \cdot \psi_{\text{в2}} &= (F_{x8} - F_{x7}) \cdot s.
\end{aligned}$$

Наукова новизна та практична значимість

Вперше для вагона дизель-поїзда ДПКр-2 була розроблена його просторова математична модель із урахуванням особливостей взаємодії окремих елементів його конструкції та можливості просадки рейкової колії. При побудові математичної моделі було запропоновано враховувати податливість рейкової колії за допомогою пружних та дисипативних елементів.

Математична модель вагона дизель-поїзда буде використовуватися для вивчення динамічних явищ та визначення динамічних навантажень елементів конструкції у процесі експлуатації. Вивчення цих явищ необхідно для оптимального вибору схеми і параметрів обладнання рухомого складу, зокрема віброзахисних пристроїв (ресорного підвішування, горизонтальних, поздовжніх та поперечних в'язей колісних пар із рамою візка, візка з кузовом), а та-

кож для зменшення динамічних сил, які діють на елементи конструкції рухомого складу та рейкову колію.

Висновки

1. На основі прийнятої розрахункової схеми була побудована просторова математична модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 для вивчення динамічних явищ, які виникають у рухомому складі та рейковій колії.

2. Розрахунки математичної моделі будуть проводитися в комп'ютерному середовищі Maple.

3. Отримані результати будуть порівнюватися з результатами експериментальних досліджень.

4. Напрямами подальших досліджень є використання отриманої моделі для дослідження силової взаємодії рухомого складу з рейковою колією при його русі як на прямих, так і на кривих ділянках колії.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Динамика локомотивов : учеб. пособие / М. А. Ибрагимов, В. И. Киселев, В. А. Рамлов, А. В. Скалин. – Москва : РГОТУПС, 2005. – 128 с.
2. Динамика установившегося движения локомотивов в кривых / С. М. Куценко, А. Э. Руссо, Э. П. Елбаев [и др.] ; под ред. С. М. Куценко. – Харьков : Высш. шк., 1975. – 132 с.
3. Доронин, С. В. Движение многосекционных локомотивов в кривых малого радиуса : монография / С. В. Доронин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. – 220 с.
4. Ибраев, Б. М. Параметры пневматического рессорного подвешивания рельсового автобуса для Казах-
станской железной дороги : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Ибраев Бейбит Максutowич ;
Моск. гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2009. – 24 с.
5. Кузишин, А. Я. Побудова механічної моделі вагона дизель-поїзда ДПКр-2 та її особливості / А. Я. Ку-
зишин, А. В. Батіг // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 20–29.
doi: 10.15802/stp2017/117936.
6. Мазнев, А. С. Конструкции и динамика электрического подвижного состава : монография / А. С. Мазнев,
А. М. Евстафьев. – Москва : ФГБОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп.», 2013. – 248 с.
7. Рейдемейстер, А. Г. Зависимость свойств пневматической рессоры от пневматического сопротивления
дресселя / А. Г. Рейдемейстер, А. В. Кивишева // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). –
С. 157–164. doi: 10.15802/stp2016/67339.
8. Сокол, Э. Н. Железнодорожно-транспортное происшествие и его механизм (Судебная экспертиза. Эле-
менты теории и практики) : монография / Э. Н. Сокол. – Львов : ПАИС, 2011. – 376 с.
9. Сокол, Э. Н. «Классический» сход с рельсов подвижного состава : метод. пособие / Э. Н. Сокол,
А. А. Переймыбида, Д. А. Радкевич ; под ред. Э. Н. Сокола. – Киев : Феникс, 2006. – 168 с.
10. Сокол, Э. Н. Крушения железнодорожных поездов (Судебная экспертиза. Элементы теории и практи-
ки) : монография / Э. Н. Сокол. – Киев : Феникс, 2007. – 355 с.
11. Сокол, Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы
теории и практики) / Э. Н. Сокол. – Киев : Транспорт України, 2004. – 386 с.
12. Трофимович, В. В. Динамика электроподвижного состава : курс лекций / В. В. Трофимович. – Хаба-
ровск : Изд-во ДВГУПС, 2004. – 94 с.
13. Application of an inclined, spinning ball-on-rotating disc apparatus to simulate railway wheel and rail contact
problems / Y. Xi, M. Björling, Y. Shi, J. Mao, R. Larsson // Wear. – 2017. – Vol. 374–375. – P. 46–53.
doi: 10.1016/j.wear.2016.12.034.
14. Kalker, J. J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction : Ph.D. Thesis /
J. J. Kalker ; University of Technology. – Delft, 1967. – 112 p.
15. Non-steady state modelling of wheel–rail contact problem / A. Guiral, A. Alonso, L. Baeza, J. G. Giménez //
Vehicle System Dynamics. – 2013. – Vol. 51. – Iss. 1. – P. 91–108. doi: 10.1080/00423114.2012.713499.
16. Wheel–rail contact: experimental study of the creep forces–creepage relationships / A. Alonso, A. Guiral,
L. Baeza, S. Iwnicki // Vehicle System Dynamics. – 2014. – Vol. 52. – Iss. sup1. – P. 469–487.
doi: 10.1080/00423114.2014.907923.

С. А. КОСТРИЦА^{1*}, Ю. Г. СОБОЛЕВСКАЯ^{2*}, А. Я. КУЗЫШИН^{3*}, А. В. БАТИГ^{4*}

^{1*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 11,
эл. почта kossa571@gmail.com, ORCID 0000-0002-7922-0975

^{2*}Каф. «Фундаментальные дисциплины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна (Львовский филиал), ул. И. Блажкевича, 12-а, Львов, Украина, 79052, тел. (032) 267 99 74,
эл. почта sobolevskyy@gmail.com, ORCID 0000-0002-8087-2014

^{3*}Лаб. «Железнодорожно-транспортные исследования», Львовский научно-исследовательский институт судебных
экспертиз, ул. Липинского, 54, Львов, Украина, 79024, тел +38 (032) 231 76 13, эл. почта kuzyshyn1993@gmail.com,
ORCID 0000-0002-3012-5395

^{4*}Лаб. «Железнодорожно-транспортные исследования», Львовский научно-исследовательский институт судебных
экспертиз, ул. Липинского, 54, Львов, Украина, 79024, тел +38 (032) 231 76 13, эл. почта batigasha1992@gmail.com,
ORCID 0000-0003-1205-6004

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАГОНА ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ДПКр-2

Цель. В научной работе на основе механической модели вагона дизель-поезда ДПКр-2 производства Крюковского вагоностроительного завода нужно построить его математическую модель для изучения динамических явлений, возникающих при движении подвижного состава по рельсовому пути как на прямых, так и на кривых участках. **Методика.** Для построения математической модели составляется система из 38 дифференциальных уравнений движения дизель-поезда. При использовании в центральном рессорном подвешивании пневматической рессоры ее эквивалентная механическая модель представляется в виде узла Кельвина-Фойгта, который включает в себя параллельно расположенный упругий элемент и элемент вязкого трения. Податливость рельсового пути учитывается упругим и диссипативным элементами. При моделировании принималось, что колесная пара и взаимодействующая с ней масса пути движутся безотрывно. В качестве возмущения при исследовании вынужденных вертикальных и горизонтальных колебаний приняты геометрические неровности левой и правой рельсов. **Результаты.** На основе принятой механической модели вагона дизель-поезда была построена математическая модель, которая состоит из 38 дифференциальных уравнений движения. **Научная новизна.** Впервые для вагона дизель-поезда ДПКр-2 была разработана его пространственная математическая модель с учетом особенностей взаимодействия отдельных элементов конструкции и возможности просадки рельсового пути. При построении математической модели было предложено учитывать податливость рельсового пути упругим и диссипативным элементами. **Практическая значимость.** Математическая модель вагона дизель-поезда будет использоваться для изучения динамических явлений и определения динамических нагрузок элементов конструкции в процессе эксплуатации. Изучение этих явлений необходимо для оптимального выбора схемы и параметров оборудования подвижного состава, в частности виброзащитных устройств (рессорного подвешивания, горизонтальных, продольных и поперечных связей колесных пар с рамой тележки, тележки с кузовом), а также для уменьшения динамических сил, действующих на элементы конструкции подвижного состава и рельсовый путь.

Ключевые слова: математическая модель; дизель-поезд; система дифференциальных уравнений; пневматическая рессора; рессорное подвешивание

S. A. KOSTRITSA^{1*}, Y. H. SOBOLEVS'KA^{2*}, A. Y. KUZYS'HYN^{3*}, A. V. BATIH^{4*}

^{1*}Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 373 15 11, e-mail kossa571@gmail.com, ORCID 0000-0002-7922-0975

^{2*}Dep. «Fundamental Disciplines», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Lviv branch), Iv. Blazkevych St., 12-a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. (032) 267 99 74, e-mail sobolevskyu@gmail.com, ORCID 0000-0002-8087-2014

^{3*}Lab. «Railway Transport Researches», Lviv Research Institute of Forensic Science, Lypynskyi St., 54, Lviv, Ukraine, 79024, tel. (032) 232 70 61, e-mail kuzyshyn1993@gmail.com, ORCID 0000-0002-3012-5395

^{4*}Lab. «Railway Transport Researches», Lviv Research Institute of Forensic Science, Lypynskyi St., 54, Lviv, Ukraine, 79024, tel. (032) 232 70 61, e-mail batigasha1992@gmail.com, ORCID 0000-0003-1205-6004

MATHEMATICAL MODEL OF DPKR-2 DYSEL TRAIN CAR

Purpose. In order to study the dynamic phenomena arising when rolling stock moves along a rail track both in the straight and curved track sections, the article is aimed to construct a mathematical model of DPKr-2 diesel train car. It will be constructed on the basis of mechanical model of this car of Kryukiv Railway Car Building Works. **Methodology.** To construct a mathematical model a system of 38 differential equations of the diesel train movement is formed. When it is used a pneumatic spring in the core stage of spring suspension, its equivalent mechanical model is presented as Kelvin-Voigt knot. It includes a parallel elastic element and an element of viscous friction. Rail track flexibility is taken into account by elastic and dissipative elements. During simulation it was assumed that the wheel pair and the track weight interacting with it were moving intact. Geometric inequalities of the left and right rails were accepted as disturbances when studying the forced vertical and horizontal oscillations. **Findings.** On the basis of the adopted mechanical model of the diesel train car we constructed the mathematical model consisting of 38 differential equations of motion. **Originality.** For the first time, for the DPKr-2 diesel train car we developed its spatial mathematical model taking into account the features of the interaction of individual elements of its construction and the possibilities of the rail track depression. When constructing the mathematical model, it was proposed to

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

take into account the flexibility of the rail track by elastic and dissipative elements. **Originality.** The mathematical model of the diesel train car will be used for studying the dynamic phenomena and determining the dynamic loads of structural elements during operation. The study of these phenomena is necessary for optimal choice of the scheme and parameters of rolling stock equipment, in particular antivibration devices (spring suspension, horizontal, longitudinal and transverse joints of wheel pairs with the bogie frame, bogie with the body), as well as for reduction of dynamic forces acting on the elements of rolling stock construction and rail track.

Keywords: mathematical model; diesel train; system of differential equations; pneumatic spring; spring suspension

REFERENCES

1. Ibragimov, M. A., Kiselev, V. I., Ramlov, V. A., & Skalin, A. V. (2005). *Dinamika lokomotivov: Uchebnoe posobie*. Moscow: RGOTUPS. (in Russian)
2. Kutsenko, S. M. (Ed.) (1975). *Dinamika ustanovivshegosya dvizheniya lokomotivov v krivyykh*. Kharkiv: Vysshaya shkola. (in Russian)
3. Doronin, S. V. (2009). *Dvizhenie mnogosektsionnykh lokomotivov v krivyykh malogo radiusa: Monografiya*. Khabarovsk: DVGUPS Publisher. (in Russian)
4. Ibraeyv, B. M. (2009). *Parametry pnevmaticheskogo ressnogo podveshivaniya relsovogo avtobusa dlya Kazakhstanskoy zheleznoy dorogi*. (Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk). Moscow: Moscow State University of Railway Engineering. (in Russian)
5. Kuzyshyn, A. Y., & Batih, A. V. (2017). Construction of mechanical model of the diesel-train DPKr-2 car and its features. *Science and Transport Progress*, 6(72), 20-29. doi: 10.15802/stp2017/117936. (in Ukrainian)
6. Maznev, A. S., & Yevstafev, A. M. (2013). *Konstruktii i dinamika elektricheskogo podvizhnogo sostava: Monografiya*. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». (in Russian)
7. Reidemeister, O. H., & Kivisheva, A. V. (2016). Dependence of air spring parameters on throttle resistance. *Science and Transport Progress*, 2(62), 157-164. doi: 10.15802/stp2016/67339. (in English)
8. Sokol, E. N. (2011). *Zheleznodorozhno-transportnoe proisshestvie i ego mekhanizm (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki): Monografiya*. Lviv: PAIS. (in Russian)
9. Sokol, E. N., Pereymybid, A. A., & Radkevich, D. A. (2006). *«Klassicheskiy» skhod s relsov podvizhnogo sostava: Methodical manual*. Kyiv: Feniks. (in Russian)
10. Sokol, E. N. (2007). *Krusheniya zheleznodorozhnykh poezdov (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki): Monografiya*. Kyiv: Feniks. (in Russian)
11. Sokol, E. N. (2004). *Skhody s relsov i stolknoveniya podvizhnogo sostava (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki)*. Kyiv: Transport Ukrainy. (in Russian)
12. Trofimovich, V. V. (2004). *Dinamika elektropodvizhnogo sostava: Kurs lektsiy*. Khabarovsk: DVGUPS. (in Russian)
13. Björling, Y. Xi, M., Shi, Y., Mao, J., & Larsson, R. (2017). Application of an inclined, spinning ball-on-rotating disc apparatus to simulate railway wheel and rail contact problems. *Wear*, 374-385, 46-53. doi: 10.1016/j.wear.2016.12.034. (in English)
14. Kalker, J. J. (1967). *On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction*. Delft: University of Technology. (in English)
15. Guiral, A., Alonso, A., Baeza, L., & Giménez, J. G. (2013). Non-steady state modeling of wheel-rail contact problem. *Vehicle System Dynamics*, 51(1), 91-108. doi: 10.1080/00423114.2012.713499. (in English)
16. Alonso, A., Guiral, A., Baeza, L., & Iwnicki, S. (2014). Wheel-railcontact: experimental study of the creep forces-creepage relationships. *Vehicle System Dynamics*, 52(1), 469-487. doi: 10.1080/00423114.2014.907923. (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., доц. М. О. Кузіним (Україна)

Надійшла до редколегії: 12.10.2017

Прийнята до друку: 9.01.2018

UDC 629.45.027.3

O. H. REIDEMEISTER^{1*}, A. V. LAGUZA^{2*}

^{1*}Dep. «Car and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail reidemeister@mail.ru, ORCID 0000-0001-7490-7180

^{2*}Dep. «Car and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail nastaci@yahoo.com, ORCID 0000-0001-8811-7243

DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF THROTTLING DEVICE FOR PNEUMATIC SPRING

Purpose. This paper focuses on determination of the dependence of the working medium flow on the capacity of the throttling device, its geometric features and the pressure difference in the pneumatic spring cylinder and in the auxiliary reservoir. **Methodology.** Calculation of the dependence of the working medium and pressure drop is performed in two ways: 1) by numerical simulation of a stationary gas flow through a throttling element; 2) its analytical calculation expression using empirical relationships (control calculation to evaluate the reliability of numerical simulation results). For the calculation, three models of throttling devices were chosen. Dependence of the flow rate of the working medium on the capacity of the throttling device and its geometric features was determined based on the approximation of the dependency graphs of the pressure drop against the mass flow rate of the working medium. **Findings.** We obtained graphical dependencies between the pressure drop and the mass flow rate of the working medium from the two calculation options. Based on the results of calculations performed with the help of a software package with visualization of the results, we calculated a proportionality coefficient that describes the dependence of the working medium flow on the throttling device capacity and its geometric features for each of the throttling elements considered, with three degrees of closure. The air flow values, obtained by numerical simulation, are greater than the flow rates obtained from semi-empirical formulas. At the same time, they are in good qualitative agreement, and the quantitative difference averages 25%, which can be regarded as confirmation of the reliability of the numerical model. Based on the calculation results, we plotted the proportionality coefficient graphs against the degree of closure of the throttling device. **Originality.** The work allows determining the degree of influence of the frictional component on the variation of the pressure difference in the pneumatic cylinder and the auxiliary reservoir of the pneumatic suspension system. Also, the work proposes a method to determine the dependence of the working medium on the capacity of the throttling device and its geometric features. **Practical value.** The ability to predict the operating parameters of the pneumatic system depending on the pneumatic resistance of the throttling device will improve the car running characteristics, increase the comfort of passenger transport, and also reduce the wear of the rolling stock and track gauge due to vehicle-track interaction.

Keywords: spring suspension; pneumatic spring; pressure drop

Introduction

Recently, pneumatic springs have become very widely used on trans-regional trains, high-speed trains [3, 16]. The advantage of pneumatic spring as an element of spring suspension is that it can be used to realize large static deflections in the secondary spring suspension (up to 300 mm) and to obtain a noise reduction in the passenger compartments. In addition, for lines with raised platforms it is necessary to maintain a constant floor height of the car regardless of the number of passengers in the car. This is provided by the operation of a le-

velling valve and pneumatic springs [16]. It is necessary to consider the generalized structure of an equivalent mechanical model, adopted on the basis of pneumatic spring tests (Fig. 1) [3].

The ability to perceive high horizontal and diagonal movements, as well as torsional resistance, makes pneumatic suspension systems an attractive solution for all types of bogies [3, 16].

In general, the pneumatic suspension system (Fig. 2) on the car has the form of the pneumatic cylinder 1 and the auxiliary reservoir 4 connected to each other [17, 19, 22]. To regulate the dissipative and elastic properties of the pneumatic suspen-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

sion system, the throttling element 2 is located in the connection fitting 3.

To calculate the properties of the pneumatic system shown in Figure 1, there is a significant number of mechanical models.

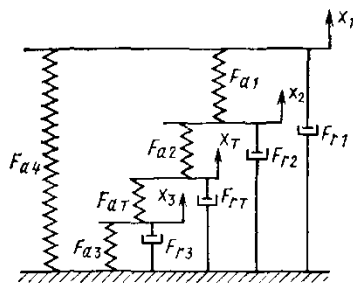


Fig. 1. Generalized structure of equivalent mechanical system

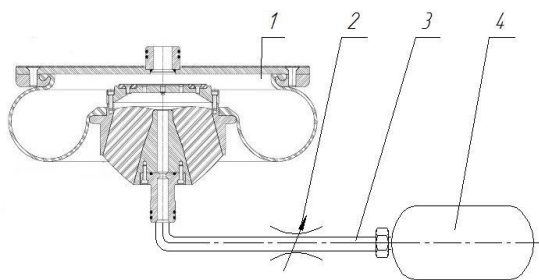


Fig. 2. Diagram of pneumatic spring with reservoir

This model is based on the analysis of the graphs obtained during the pneumatic spring tests. The model consists of elements with instantaneous contacts, represented in the same way as in the first model, in the form of a connection between elastic and dissipative elements. Herewith, in the model, each of the elastic elements with a force F_a and dissipative ones with a force F_r enables a physical interpretation, which allows us to propose a corresponding approximating expression for it. In particular, the elements with forces F_{a1} , F_{a2} , F_{a3} model the elastic properties of the main and additional capacity of air suspension. The elastic element with a force F_{a1} simulates the change in the effective area of the pneumatic cylinder when it deforms and the elasticity of the rubber-cord shell. The law of change is determined by the results of a static calibration of the pneumatic springs and approximated by a piecewise-linear relationship.

The elements F_{r1} and F_{r2} simulate losses due to air throttling. At the same time, the element F_{r3}

works mainly at low velocities of deformation of the pneumatic cylinder (subcritical mode of air flow through the throttle opening); the element F_{r2} is switched on at the deformation rate of the pneumatic spring when the supercritical mode of air flow through the throttle occurs.

However, the awkwardness of the model and a significant number of parameters limit its wide application in theoretical calculations.

Another structural scheme for the calculation of pneumatic spring is presented in [6] (Fig. 3).

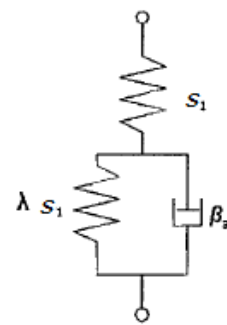


Fig. 3. Mechanical model of pneumatic spring

The presented model of the pneumatic spring takes into account the static stiffness of the pneumatic cylinder S_1 , the effect of changing the ratio of air volumes in the pneumatic cylinder and the auxiliary reservoir to the stiffness of the pneumatic spring λS_1 and the damping coefficient of the equivalent viscous friction of the pneumatic spring β_e .

The defining parameters of this pneumatic spring scheme are: the load-bearing capacity of the spring, the parameters of the throttling device and air.

This model gives fairly accurate results in the case of small oscillations.

The more complex and frequently used model is the Nishimura pneumatic spring model (Fig. 4). The Nishimura pneumatic spring model was developed more than 40 years ago [9, 10, 15, 18]. The model takes into account the changes in the stiffness of the pneumatic cylinder K_1 and the reservoir K_2 , depending on the change in air volumes in them, K_3 is a change in the level of stiffness of the pneumatic cylinder. The model can take into account both linear and quadratic changes in

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

the viscosity index C . That allows using it both for modelling the stiffness of a pneumatic balloon and for determining the resistance to air flow through a connecting armature.

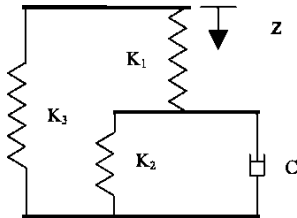


Fig. 4. Model of Nishimura pneumatic spring

VAMPIRE model is an extension of the Nishimura model [9, 18, 19] with quadratic attenuation. In addition, inertial effect M and auxiliary stiffness k are introduced (Fig. 5).

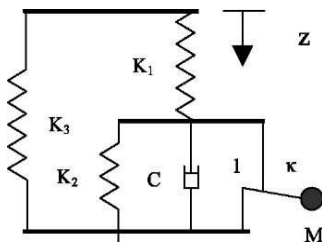


Fig. 5 Model of VAMPIRE pneumatic spring

Berg pneumatic springs model, often found in the literature under the name GENSYS, is three-dimensional and can describe transverse, longitudinal and vertical oscillations [9, 11, 14, 18, 20, 24]. It is worth mentioning that the model describes several parameters of the spring: elasticity, friction and viscosity. The vertical model has a nonlinear attenuation, which depends on the rate of change in pressure in the pneumatic cylinder.

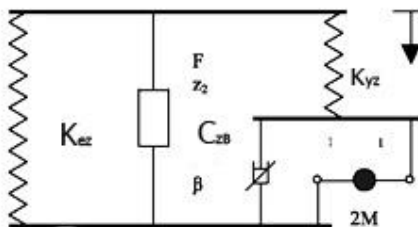


Fig. 6. Model of GENSYS (Berg) pneumatic spring

There is another model of pneumatic springs Bouc-Wen [12, 13, 18, 21], which includes not only elastic and dissipative elements describing the state of gas in the system, but also a block that simulates changes in the condition of the rubber-cord shell of a pneumatic cylinder.

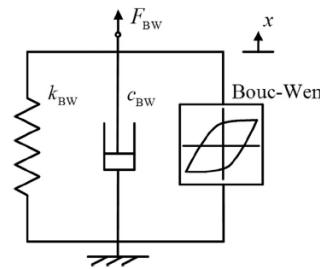


Fig. 7. Model of Bouc-Wen pneumatic spring:
 F_{BW} – vertical force from the body, k_{BW} – non-linear elastic stiffness, c_{BW} – damping component

To describe the behavior of pneumatic springs, the mechanical model includes three parallel branches: non-linear elastic stiffness k_{BW} ; damping component c_{BW} ; block, which determines the parameters of the pneumatic cylinder operation depending on the behavior of the rubber-cord shell Bouc-Wen.

The branch with nonlinearly elastic stiffness is used to simulate the work of air within the pneumatic spring and to describe its geometric parameters, as well as the thermodynamic processes that take place within the pneumatic spring, which can be derived in accordance with the thermodynamic equation.

The branch with a damping component is used to simulate the resistance of the air flow in the pipe of the system «pneumatic cylinder – connecting fittings – auxiliary reservoir».

The friction branch is a block simulating a hysteresis loop and amplitude dependences.

The widespread model is considered to be that [1, 17] describing the pneumatic spring as a connection between the parallel installed elastic element with stiffness C and viscous friction element with viscosity β (Fig. 8).

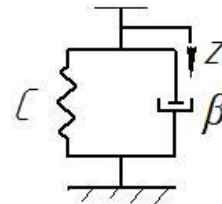


Fig. 8. Equivalent mechanical system

In the previously mentioned schemes, the role of the throttling device was performed by additionally introduced viscosity parameters.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Throttle is local adjustable or non-adjustable resistance, set in the way of the working fluid flow [1].

The main throttle characteristics are the metering and tuning characteristics. The metering characteristic is the relationship between air flow through the throttle and the ratio of pressures before and after the throttle. The metering characteristic largely depends on the regime of laminar or turbulent flow. The flow regime is determined from the Reynolds number. When $R_e < R_{cr}$ the flow is considered laminar, when $R_e > R_{cr}$ -turbulent.

According to functional purposes, the throttles are classified into constant and variable ones. According to the principle of operation, there are linear and quadratic throttles.

Constant throttles are generally an orifice in the plate. They are conventionally divided into throttling plugs and bushings.

The wide class of adjustable throttles include: cylindrical, conical needle, threaded, throttles such as «rotary valve», flapper-nozzle and spool-type throttling valves, as well as the role of a throttle can be performed by throttling valves.

Purpose

The purpose of this work is to determine the dependence of the working medium flow on the capacity of the throttling device, its geometric features and the pressure difference in the pneumatic spring cylinder and in the auxiliary reservoir.

An important task in the course of the work will be to determine the pressure difference when the working medium passes through the throttling element. The necessary part of the work is also to determine the reliability of the results obtained when determining the pressure difference in the throttling device.

Methodology

Calculation of the dependence of the working medium and pressure drop is performed in two ways:

- By numerical simulation of a stationary gas flow through a throttling element;
- Its analytical calculation expression using empirical relationships (control calculation to evaluate the reliability of numerical simulation results).

We selected several different types of throttling devices [4, 5], namely: corrosion-proof throttle valve Aisi 304 (L)/316 (L) DN 40 (Fig. 9); San Marino valves for air, gases and liquids normally open of type «T» (Figure 10) and type «Y» (Figure 11) with G1 1/4» connecting thread.

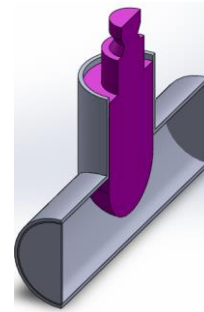


Fig. 9. Corrosion-proof throttle valve Aisi 304 (L)/316 (L) DN 40

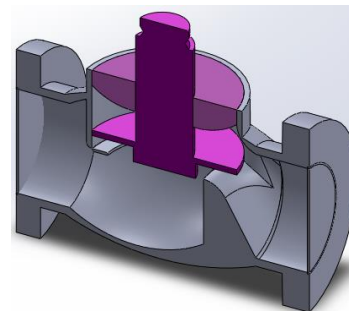


Fig. 10. San Marino valve for air, gases and liquids normally open of type «T»

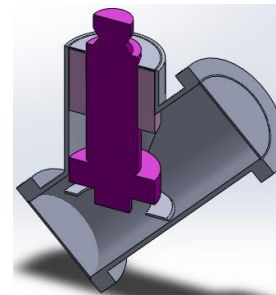


Fig. 11. San Marino valve for air, gases and liquids normally open of type «Y»

The diameters of the inlet and outlet openings are 40 mm. The length of the Aisi throttle valve body is 160 mm, San Marino valves for air, gases and liquids normally open of type «T» – 120 mm and type «Y» – 113 mm.

For analysis, we selected three stem positions: open – «0», closed by 50% – «1/2», closed by 75% – «3/4».

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

In numerical simulation, we consider the motion of the working medium (air) in the cavity of the throttling element represented by the 3D model. The flow is stationary turbulent. The boundary conditions are given as follows (Figure 12). The surface that bounds the cavity is divided into three areas:

- inlet opening – the pressure is determined;
- outlet opening – the mass air flow is determined;
- walls – all motion speed components are zero.

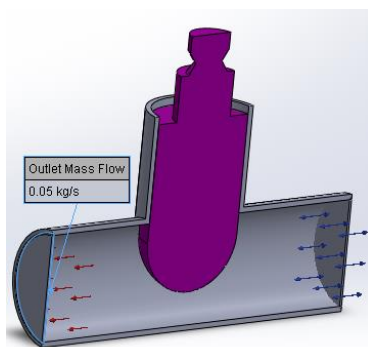


Fig. 12. Boundary conditions

The air movements describe the averaged Navier-Stokes equations with two additional equations of the $k-\varepsilon$ model of turbulent flow [25].

As the input data, we set the pressure of the working medium obtained in calculations of the generalized pneumatic spring model in the Matlab Simulink software package [23]. The change in the flow rate of the working medium at the outlet from the throttling device is set in the range from 0.001 kg/s to 0.26 kg/s, also according to the previously obtained data.

The calculation is carried out at the environmental temperature equal to 20°C. The software package allows taking into account the properties of various materials used in the design of throttling devices, such as a bronze body, a brass plate, a steel stem. Therefore, in order to take into account the different degrees of resistance when the working medium rubs against the surface, one of the input parameters indicates the type of material.

During the calculation it is possible to see not only the final result, as a diagram with pressure values, but also to trace the nature of the working medium flow at any point of the throttling device (Fig. 13).

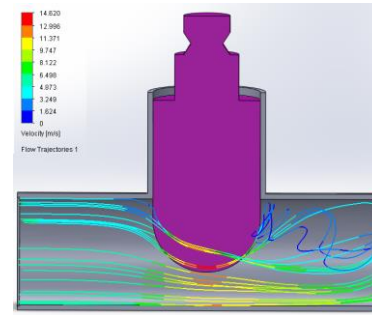


Fig. 13. Distribution of velocities of the working medium in the throttling device

Based on the results of calculations, graphs of the dependence of the pressure drop on the flow rate of the working medium are plotted.

To evaluate the reliability of the results obtained, we perform calculations using the formulas given in [1, 2, 8].

$$R_e = \frac{4 \cdot r_h \cdot \omega \cdot \rho}{\eta_d}, \quad (1)$$

where r_h – hydraulic radius of the channel section, m; ω – average velocity of compressed gas flow along the channel section, m/s; ρ – gas density, kg/m³; η_d – coefficient of dynamic viscosity, determined from the diagrams [7], Pa s.

$$\omega = \frac{G}{\rho \cdot F}, \quad (2)$$

where G – mass flow rate of gas, kg/s; F – cross-sectional area of the channel, m².

The density of compressed gas for working pressure is calculated by the formula:

$$\rho = \frac{(P_a + P_{ov}) \cdot \mu}{R \cdot T}, \quad (3)$$

where P_a – atmospheric pressure, kPa; P_{ov} – overpressure in the system of pneumatic springs, kPa; R – universal gas constant, J/(mol K); T – temperature, K; μ – molar mass of gas, mol.

The pressure loss depends on two coefficients of resistance: the coefficient of resistance ζ_{fr} characterizing the frictional losses during the movement of the working fluid and the local loss factor at the input ζ_{in} .

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

The coefficient of resistance, characterizing the friction loss, is determined by the formula:

– at the gas motion, when $R_{cr} < R_e < 10^5$, we use the Blasius formula:

$$\zeta_{fr} = 0.314 \cdot R_e^{-0.25}, \quad (4)$$

– at the gas motion, when $10^5 < R_e < 10^8$, we use the formula Nikuradze:

$$\zeta_{fr} = 0.00332 + 0.221 \cdot R_e^{-0.237}, \quad (5)$$

The coefficient of local losses at the input ζ_{in} is determined depending on the shape and geometric dimensions of the inlet opening [2].

The coefficients of local losses in many cases are determined from tables and graphs obtained experimentally. So the local loss coefficients for the presented throttling elements are selected from the reference tables [2, 8].

The loss of pressure is determined by the formula [2, 8]:

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2}, \quad (6)$$

According to the obtained data, graphs of dependence of pressure drop on mass flow were also constructed for further comparison with the calculation in the shown complex with the visualization of calculations.

The dependence of the flow rate of the working medium on the type of throttling device will be determined based on the approximation of the graphs of the dependence of the pressure drop on the mass flow:

$$G = \alpha \cdot \sqrt{\Delta P}, \quad (7)$$

where α – proportionality coefficient.

Findings

The graphical dependences of the mass flow rate of the working medium G on the pressure difference ΔP are shown in Fig. 14–16 (based on the results of numerical simulation) and in Fig. 17–19 (based on calculations using empirical dependencies). The degree of closure of the throttling device is denoted by φ .

The value of the air flow, obtained by numerical simulation, is greater than the flow rates ob-

tained from semi-empirical formulas. At the same time, they are in good qualitative agreement, and the quantitative difference averages 25%, which can be regarded as confirmation of the reliability of the numerical model.

As can be seen from the Figures 14–16, the graphs are well approximated by the function $G = \alpha \cdot \sqrt{\Delta P}$, which allows us to show the dependence of the working medium flow rate on the type of throttling device. Calculation using a software package with visualization of the results gives more accurate data and visually realizes the process occurring in the throttling device than the calculation using approximate formulas.

Based on the results of calculations performed with the help of a software package with visualization of the results, we calculated a proportionality coefficient that describes the dependence of the working medium flow on the throttling device capacity and its geometric features for each of the throttling elements considered, with three degrees of closure.

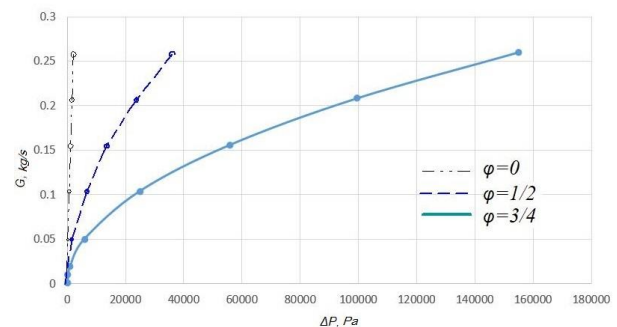


Fig. 14. Graph of the mass flow rate versus the pressure difference of Aisi throttle valve based on the mathematical modelling results

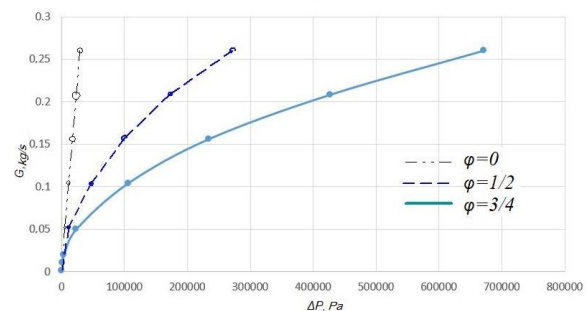


Fig. 15. Graph of the mass flow rate versus the pressure difference for San Marino valve type «T» based on the mathematical modelling results

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

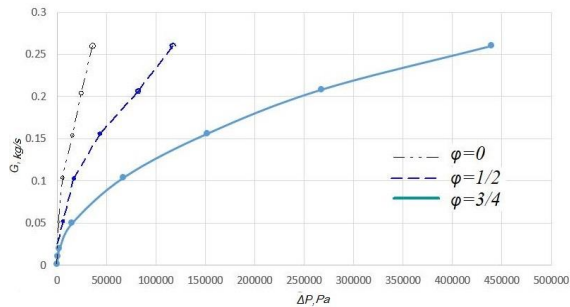


Fig. 16. Graph of the mass flow rate versus the pressure difference for San Marino valve type «Y» based on the mathematical modelling results

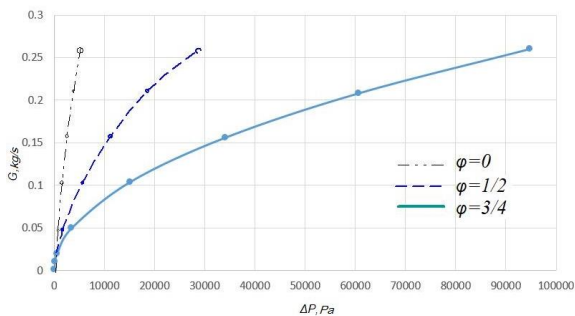


Fig. 17. Graph of the mass flow rate versus the pressure difference for Aisi throttle valve based on the calculation results using empirical dependencies

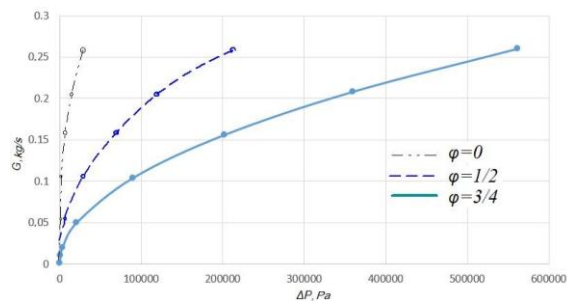


Fig. 18. Graph of the mass flow rate versus the pressure difference for San Marino valve type «T» based on the calculation results using empirical dependencies

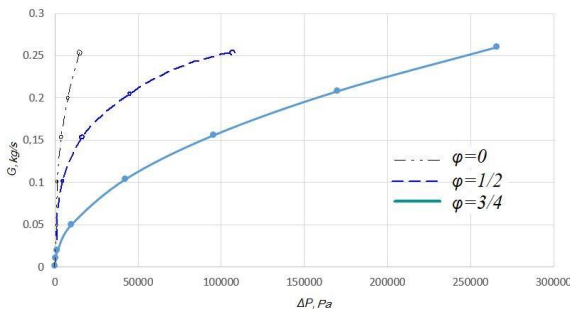


Fig. 19. Graph of the mass flow rate versus the pressure difference for San Marino valve type «Y» based on the calculation results using empirical dependencies

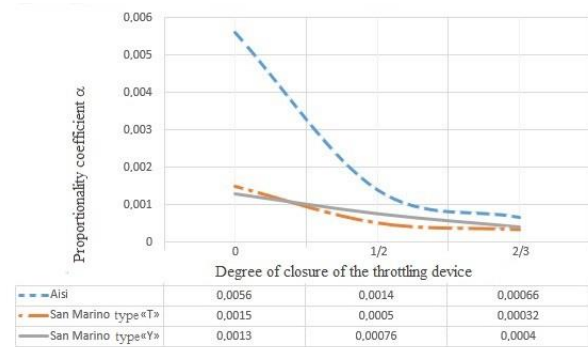


Fig. 20. Graph of the mass flow rate versus the type of throttling device

Originality and practical value

The work allows determining the degree of influence of the frictional component on the variation of the pressure difference in the pneumatic cylinder and the auxiliary reservoir of the pneumatic suspension system. Also, the work proposes a method to determine the dependence of the working environment on the capacity of the throttling device and its geometric features.

The practical value lies in the possibility to predict the operating parameters of the pneumatic system depending on the pneumatic resistance of the throttling device will improve the car running characteristics, increase the comfort of passenger transport, and also reduce the wear of the rolling stock and track gauge due to vehicle-track interaction.

Conclusions

Analyzing the above graphs, we can conclude that the use of modern computational complexes with visualization of the results greatly increases the accuracy of calculation and allows analyzing the operation of the system and the state of the working medium in it not only by the final results in digital form, but also observing them directly at the time of flow process.

The obtained data of the pressure drop dependence on the working medium mass flow allowed determining the law that describes the process flowing in the throttling devices. The dependence of the flow rate of the working medium on the capacity of the throttling device and the geometric capabilities of its design is determined.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Средства гидропневмоавтоматики : учеб. пособие / А. Ф. Андреев, П. П. Артемьев, П. Р. Бартош [и др.]. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ БГПА-ИСН, 1998. – 224 с.
2. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – Москва : Машиностроение, 2011. – 672 с.
3. Камаев, В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава / В. А. Камаев. – Москва : Машиностроение, 1980. – 215 с.
4. Клапан дроссельный нержавеющий AISI 304(L)/316(L) [Electronic resource]. – Available at: <http://www.progressteel.com.ua/armatura/drosselnjy-klapan/>. – Title from the screen. – Accessed : 09.01.2018.
5. Клапаны для воздуха, газа и жидкостей с пневмоуправлением (San Marino) [Electronic resource]. – Available at: <http://docplayer.ru/39907306-Klapany-dlya-vozduha-gazov-i-zhidkostey-s-pnevmoupravleniem-san-marino.html>. – Title from the screen. – Accessed : 09.01.2018.
6. Механическая часть тягового подвижного состава : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / И. Б. Бирюков, А. Н. Савоськин [и др.]. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с.
7. Справочник машиностроителя : в 6 т. / под ред. проф. Ачеркана Н. С. – Москва : Гос. науч.-тех. изд-во машиностр. лит-ры, 1956. – Т. 2. – 574 с.
8. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости) : учеб. для вузов / Р. Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Ленинград : Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 672 с.
9. Abid, H. J. Equivalent Air Spring Suspension Model for Quarter-Passive Model of Passenger Vehicles / H. J. Abid, J. Chen, A. A. Nassar // International Scholarly Research Notices. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6. doi: 10.1155/2015/974020.
10. Ahmed, M. I. Mathematical Modeling and Control of Active Suspension System for a Quarter Car Railway Vehicle [Electronic resource] / M. I. Ahmed, M. Y. Hazlina, M. M. Rashid // Malaysian J. of Mathematical Sciences. – 2016. – Vol. 10 (S). – P. 227–241. Available at: <http://einspem.upm.edu.my/journal/fullpaper/vol10feb2/No20.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 09.01.2018.
11. Aizpun, M. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to identify the vehicle model parameters / M. Aizpun, J. Vinolas, A. Alonso // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2014. – Vol. 228. – Iss. 4. – P. 1–14. doi: 10.1177/0954409713478592.
12. A novel air spring dynamic model with pneumatic thermodynamics, effective friction and viscoelastic damping / Hengjia Zhu, James Yang, Yunqing Zhang, Xingxing Feng // Journal of Sound and Vibration. – 2017. – Vol. 408. – P. 87–104. doi: 10.1016/j.jsv.2017.07.015.
13. A novel MR device with variable stiffness and damping capability / Shiyu Zhao, Huaxia Deng, Jin Zhang, Liandong Yu, Shuaishuai Sun, Weihua Li, Laijun Zhou // Intern. Journal of Aerospace and Lightweight Structures. – 2013. – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 325–335. doi: 10.3850/S2010428613000032.
14. Docquier, N. Model-based evaluation of railway pneumatic suspensions / N. Docquier, P. Fisette, H. Jeanmart // Vehicle System Dynamics: Intern. J. of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2008. – Vol. 46. – P. 481–493. doi: 10.1080/00423110801993110.
15. Gialleonardo, E. D. The influence of track modelling options on the simulation of rail vehicle dynamics / Egidio Di Gialleonardo, Francesco Braghin, Stefano Bruni // Journal of Sound and Vibration. – 2012. – Vol. 331. – P. 4246–4258. doi: 10.1016/j.jsv.2012.04.024.
16. Iwnicki, S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics / S. Iwnicki. – Boca Raton : CRC Press, 2006. – 552 p. doi: 10.1201/9781420004892.
17. Mathematical modelling of the secondary airsprung suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort / A. Facchinetti, L. Mazzola, S. Alfi, S. Bruni // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2010. – Vol. 48. – Iss. 5. – P. 429–449. doi: 10.1080/00423114.2010.486036.
18. Mazzola, L. Secondary suspension of railway vehicles – air spring modelling: Performance and critical issues / L. Mazzola, M. Berg // Journal of Rail and Rapid Transit. – 2014. – Vol. 228. – Iss. 3. – P. 225–241. doi: 10.1177/0954409712470641.
19. Multiphysics modelling of multibody systems: application to car semi-active suspensions / N. Docquier, A. Poncelet, M. Delannoy, P. Fisette // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2010. – Vol. 48, No. 12. – P. 1439–1460. doi: 10.1080/00423110903509335.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

20. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions / N. Docquier, A. Poncelet, M. Delannoy, P. Fiset // *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. – 2007. – Vol. 46, No. 6. – P. 505–524. doi: 10.1080/00423110601050848.
21. Nonlinear dynamic model of air spring with a damper for vehicle ride comfort / H. Zhu, J. Yang, Y. Zhang, X. Feng, Z. Ma // *Nonlinear dynamic*. – 2017. – Vol. 89. – Iss. 2. – P. 1545–1568. doi: 10.1007/s11071-017-3535-9.
22. Raju, K. R. Vineeth Developments in vibration control of structures and structural components with magnetorheological fluids / K. R. Raju, D. V. Varma // *Current Science*. – 2017. – Vol. 112. – Iss. 3. – P. 499–508. doi: 10.18520/cs/v112/i03/499-508.
23. Reidemeister, O. H. Dependence of air spring parameters on throttle resistance / O. H. Reidemeister, A. V. Kivisheva // *Наука та прогрес транспорту*. – 2016. – № 2 (62). – P. 157–164. doi: 10.15802/stp2016/67339.
24. Sayyaadi, H. A New model in rail vehicles dynamics considering nonlinear suspension components behavior / H. Sayyaadi, N. Shokouhi // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2009. – Vol. 55. – P. 222–232. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.01.003.
25. Wilcox, D. C. Turbulence modeling for CFD / D. C. Wilcox. – La Cañada Flintridge, California : DCW Industries, Inc. La Canada, 1994. – 460 p.

О. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР^{1*}, А. В. ЛАГУЗА^{2*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство» Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта reidemeister@mail.ru, ORCID 0000-0001-7490-7180

^{2*}Каф. «Вагони та вагонне господарство» Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта nastaci@yahoo.com, ORCID 0000-0001-8811-7243

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДРОСЕЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ

Мета. У науковій роботі необхідно розглянути визначення залежності витрати робочого середовища від пропускної здатності дроселюючого пристрою, його геометричних особливостей, різниці тисків у балоні пневматичної ресори та в додатковому резервуарі. **Методика.** Розрахунок залежності кількості робочого тіла та перепаду тиску виконаний двома способами: 1) чисельним моделюванням стаціонарного потоку газу через дроселюючий пристрій; 2) аналітичним розрахунковим виразом із використанням емпіричних залежностей (контрольний розрахунок для оцінки достовірності результатів чисельного моделювання). Для розрахунку було обрано три моделі дроселюючих пристроїв. Залежність витрат робочого середовища від пропускної здатності дроселюючого пристрою була визначена, виходячи з апроксимації графіків залежності перепадів тисків від масових витрат робочого середовища. **Результати.** Отримано графічні залежності між перепадом тисків і масовими витратами робочого середовища за двома варіантами розрахунку. Із розрахунків, проведених за допомогою програмного комплексу з візуалізацією результатів, обчислений коефіцієнт пропорційності. Він описує залежність витрат робочого середовища від пропускної здатності дроселюючого пристрою з урахуванням геометричних особливостей для кожного з розглянутих елементів при трьох ступенях їх закриття. Значення витрат повітря, отримані шляхом чисельного моделювання, більше ніж значення, знайдені за напівемпіричними формулами. У той же час, вони знаходяться в хорошій якійсній відповідності, а кількісна різниця становить у середньому 25 %, що можна розглядати як підтвердження достовірності чисельної моделі. За результатами розрахунків побудовані графіки залежності коефіцієнта пропорційності від ступеня закриття дроселюючого пристрою. **Наукова новизна.** Робота дозволяє виявити ступінь впливу складової сили тертя на зміну різниці тисків у пневмобалоні та додатковому резервуарі системи пневматичного підвищення. Також у роботі пропонується спосіб виявлення залежності витрат робочого середовища від пропускної здатності дроселюючого пристрою. **Практична значимість.** Можливість прогнозування параметрів пневматичної системи залежно від пневматичного опору дроселюючого пристрою дозволить поліпшити ходові характеристики вагонів, підвищити комфортабельність перевезення пасажирів, а також знизити знос рухомого складу та рейкової колії внаслідок взаємодії «екіпаж-шлях».

Ключові слова: ресорне підвищення; пневматична ресора; втрати тиску

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР^{1*}, А. В. ЛАГУЗА^{2*}

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта reidemeister@mail.ru, ORCID 0000-0001-7490-7180

^{2*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта nastaci@yahoo.com, ORCID 0000-0001-8811-7243

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДРОССЕЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ РЕССОРЫ

Цель. В научной работе необходимо рассмотреть определение зависимости расхода рабочей среды от пропускной способности дросселирующего устройства, его геометрических особенностей, разности давления в баллоне пневматической рессоры и в дополнительном резервуаре. **Методика.** Расчет зависимости рабочей среды и перепада давления выполнен двумя способами: 1) численным моделированием стационарного потока газа через дросселирующее устройство; 2) аналитическим расчетным выражением с использованием эмпирических зависимостей (контрольный расчет для оценки достоверности результатов численного моделирования). Для расчета было выбрано три модели дросселирующих устройств. Зависимость расхода рабочей среды от пропускной способности дросселирующего устройства и его геометрических особенностей была определена, исходя из аппроксимации графиков зависимости перепада давления от массового расхода рабочей среды. **Результаты.** Получены графические зависимости между перепадом давлений и массовым расходом рабочей среды по двум вариантам расчета. Из расчетов, проведенных с помощью программного комплекса с визуализацией результатов, вычислен коэффициент пропорциональности. Он описывает зависимости расхода рабочей среды от пропускной способности дросселирующего устройства с учетом его геометрических особенностей для каждого из рассмотренных элементов при трех степенях закрытия. Значения расхода воздуха, полученные путем численного моделирования, больше значений расхода, найденных по полуэмпирическим формулам. В то же время, они находятся в хорошем качественном соответствии, а количественная разница составляет в среднем 25 %, что можно рассматривать как подтверждение достоверности численной модели. По результатам расчетов построены графики зависимости коэффициента пропорциональности от степени закрытия дросселирующего устройства. **Научная новизна.** Работа позволяет выявить степень влияния составляющей силы трения на изменение разности давлений в пневмобаллоне и дополнительном резервуаре системы пневматического подвешивания. Также в работе предлагается способ выявления зависимости затрат рабочей среды от пропускной способности дросселирующего устройства и его геометрических особенностей. **Практическая значимость.** Возможность прогнозирования рабочих параметров пневматической системы в зависимости от пневматического сопротивления дросселирующего устройства позволит улучшить ходовые характеристики вагонов, повысить комфортабельность перевозки пассажиров, а также снизить износ подвижного состава и рельсовой колеи вследствие взаимодействия «экипаж-путь».

Ключевые слова: рессорное подвешивание; пневматическая рессора; потери давления

REFERENCES

1. Andreev, A. F., Artemev, P. P., Bartosh, P. R., Bartashevich, L. V., Bogdan, N. V., Korolkevich, A. V. & Metlyuk, N. F. (1998). *Gidropnevmoavtomatika i gidroprivod mobilnykh mashin. Sredstva gidropnevmoavtomatiki: Uchebnoe posobie*. Minsk: VUZ-YuNITI BGPA-ISN. (in Russian)
2. Idelchik, I. Y. (1992). *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
3. Kamaev, V. A. (1980). *Optimizatsiya parametrov khodovykh chastey zhelezнодорожного подвижного состава*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
4. Klapán drosselnyy nerzhavayushchiy AISI 304(L)/316(L). Retrived from <http://www.progressteel.com.ua/armatura/drosselnyjj-kapan/>. (in Russian)
5. Klapany dlya vozdukhа, gaza i zhidkostey s pnevmoupravleniem (San Marino). Retrived from <http://docplayer.ru/39907306-Klapany-dlya-vozdukhа-gazov-i-zhidkostey-s-pnevmoupravleniem-san-marino.html>. (in Russian)
6. Biryukov, I. B., Savoskin, A. N., & Burchak G. P. et al. (1992). *Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava: Uchebnik dlya vuzov zhelezнодорожного транспорта*. Moscow: Transport. (in Russian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

7. Acherkan, N. S. (Ed). (1956). *Spravochnik mashinostroitel'ya*. (Vol. 1-6). Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury. (in Russian)
8. Chugaev, R. R. (1982). *Gidravlika (Tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti): Uchebnik dlya vuzov*. Leningrad: Energoizdat, Leningradskoe otdelenie. (in Russian)
9. Abid, H. J., Chen, J., & Nassar, A. A. (2015). Equivalent Air Spring Suspension Model for Quarter-Passive Model of Passenger Vehicles. *International Scholarly Research Notices*, 2015, 1-6. doi: 10.1155/2015/974020. (in English)
10. Ahmed, M. I., Hazlina, M. Y., & Rashid, M. M. (2016). Mathematical Modeling and Control of Active Suspension System for a Quarter Car Railway Vehicle. *Malaysian J. of Mathematical Sciences*, 10(S), 227-241. Retrived from <http://einspem.upm.edu.my/journal/fullpaper/vol10sfeb2/No20.pdf>. (in English)
11. Aizpun, M., Vinolas, J., & Alonso, A. (2014). Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to identify the vehicle model parameters. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: J. of Rail and Rapid Transit*, 228(4), 1-14. doi: 10.1177/0954409713478592. (in English)
12. Hengjia Zhu, James Yang, Yunqing Zhang, & Xingxing Feng (2017). A novel air spring dynamic model with pneumatic thermodynamics, effective friction and viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration*, 408, 87-104. doi: 10.1016/j.jsv.2017.07.015. (in English)
13. Shiyu Zhao, Huaxia Deng, Jin Zhang, Liandong Yu, Shuaishuai Sun, Weihua Li, & Laijun Zhou (2013). A novel MR device with variable stiffness and damping capability. *Intern. Journal of Aerospace and Light-weight Structures*, 3(3), 325-335. doi: 10.3850/S2010428613000032. (in English)
14. Docquier, N., Fiset, P., & Jeanmart, H. (2008). Model-based evaluation of railway pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 46, 481-493. doi: 10.1080/00423110801993110. (in English)
15. Gialleonardo, E. D., Braghin, F., & Bruni, S. (2012). The influence of track modelling options on the simulation of rail vehicle dynamics. *Journal of Sound and Vibration*, 331, 4246-4258. doi: 10.1016/j.jsv.2012.04.024. (in English)
16. Iwnicki, S. (2006). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Boca Raton: CRC Press. doi: 10.1201/9781420004892. (in English)
17. Facchinetti, A., Mazzola, L., Alfi, S., & Bruni, S. (2010). Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 48(1), 429-449. doi: 10.1080/00423114.2010.486036. (in English)
18. Mazzola, L., & Berg, M. (2014). Secondary suspension of railway vehicles – air spring modelling: Performance and critical issues. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(3), 225-241. doi: 10.1177/0954409712470641. (in English)
19. Docquier, N., Poncelet, A., Delannoy, M., & Fiset, P. (2007). Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 46(6), 505-524. doi: 10.1080/00423110601050848. (in English)
20. Docquier, N., Poncelet, A., Delannoy, M., & Fiset, P. (2010). Multiphysics modelling of multibody systems: application to car semi-active suspensions. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 48(12), 1439-1460. doi: 10.1080/00423110903509335. (in English)
21. Zhu, H., Yang, J., Zhang, Y., Feng, X., & Ma, Z. (2017). Nonlinear dynamic model of air spring with a damper for vehicle ride comfort. *Nonlinear dynamic*, 89(2), 1545-1568. doi: 10.1007/s11071-017-3535-9. (in English)
22. Raju, K. R., & Varma, D. V. (2017). Vineeth Developments in vibration control of structures and structural components with magnetorheological fluids. *Current Science*, 112(3), 499-508. doi: 10.18520/cs/v112/i03/499-508. (in English)
23. Reidemeister, O. H., & Kivisheva, A. V. (2016). Dependence of air spring parameters on throttle resistance. *Science and Transport Progress*, 2(62), 157-164. doi: 10.15802/stp2016/67339. (in English)
24. Sayyaadi, H., & Shokouhi, N. (2009). A New model in rail vehicles dynamics considering nonlinear suspension components behavior. *International Journal of Mechanical Sciences*, 55, 222-232. doi: 10.1016/j.ijmesci.2009.01.003. (in English)
25. Wilcox, D. C. (1994). *Turbulence modeling for CFD*. La Cañada Flintridge, California: DCW Industries, Inc. La Canada. (in English)

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

Received: Sept. 22, 2017

Accessed: Jan. 10, 2018

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.4.053:621.383.51

В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ¹, А. Б. ГНИЛЕНКО², С. В. ПЛАКСИН³, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ^{4*},
Ю. В. ШКИЛЬ⁵

¹Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепро, Украина, 49005, тел.+38 (056) 370 22 03, эл. почта vad@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-5504-4524

²Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, эл. почта gnilenko@ua.fm, ORCID 0000-0002-1380-1195

³Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, эл. почта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{4*}Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, эл. почта plm@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-3718-0733

⁵Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, эл. почта siv@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Цель. Основной целью исследования является совершенствование магнитолевитационной технологии с использованием электродинамического подвеса и обеспечение ее функционирования на основе экологически рациональных энергосистем. Это означает возможность создания на основе магнитолевитационной технологии транспортно-энергетической системы, использующей возобновляемые источники энергии (в частности, фотоэлектрические преобразователи) и подключенной к национальной/локальной энергосетям в качестве потребителя и производителя энергии одновременно. **Методика.** Проведенное исследование, анализ и обобщающие выводы базируются как на результатах работ по данной тематике, так и на собственных наработках авторов. При проведении исследований применялись методы системного анализа и компьютерного моделирования компонентов большой киберфизической транспортно-энергетической системы. **Результаты.** Разработаны физико-технические основы создания перспективной транспортно-энергетической системы, включающей высокоскоростной наземный транспорт на электродинамическом подвесе и распределенный фотоэлектрический энергокомплекс, адаптированный к особенностям работы данного вида транспорта и гарантирующий его надежное функционирование в любых погодных условиях. **Научная новизна.** Впервые обоснована возможность создания единого транспортного комплекса, объединяющего в себе скоростную магнитолевитационную систему и распределенную систему электропитания на основе солнечной энергии. Она одновременно является неотъемлемой частью прецизионной быстродействующей системы управления, работающей в режиме реального времени. **Практическая значимость.** Предложенное научно-техническое решение позволяет на основе возобновляемого источника энергии решить проблемы электропитания и управления высокоскоростным транспортом. А за счет включения распределенной системы электропитания в локальные интеллектуальные энергосистемы по технологии SMART-grid дает возможность оптимизировать энергопотребление территорий, по которым проходит магистраль высокоскоростного транспорта.

Ключевые слова: магнитолевитационный (МАГЛЕВ) транспорт; распределенная система электропитания; солнечная энергия; прецизионная быстродействующая система управления

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Введение

Усовершенствование транспортных и энергетических технологий в XXI веке должно следовать принципам устойчивого развития, что предполагает, с одной стороны, ограничение энергопотребления транспортными системами с одновременным уменьшением их негативного воздействия на экосистемы территорий, а с другой стороны – удовлетворение потребности социума в сокращении времени, затрачиваемого на перемещения людей и товаров. Проблематичность достижения указанной цели в рамках традиционных транспортных и энергетических технологий кажется очевидной – энергозатраты транспортных систем превышают треть потребляемой энергии, а наиболее быстрый вид транспорта – воздушный, – является одним из ведущих загрязнителей атмосферы. Одним из перспективных путей решения данной проблемы представляется объединение в единой системе технологий возобновляемых источников энергии и магнитолевитационного транспорта. Указанное выше объединение может привести к положительному синергетическому эффекту при решении актуальной задачи создания высокоскоростного наземного транспорта на основе экологически рациональных энергосистем, которая, к тому же, входит в число приоритетов Рамочных Программ Евросоюза в области науки и технологий [10]. В разработке таких транспортных систем с магнитной левитацией (МАГЛЕВ) активно участвуют ученые передовых стран, в том числе и Украины [4]. Проблемами возобновляемой энергетики занимается целый ряд институтов и предприятий в Украине: Институт электродинамики НАН Украины, Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, завод «Преобразователь» (г. Запорожье), КБ «Конкорд» (г. Днепр), Институт проблем энергосбережения НАН Украины, КБ «Южное», Институт общей энергетики НАН Украины, а также ряд зарубежных исследовательских центров, посвятивших множество публикаций проблеме построения электротехнических комплексов на возобновляемых источниках энергии [11, 13, 14]. Необходимость таких разработок в Украине продиктована не только проблемой энергонезависимости страны, но и более глобальной

проблемой – опасностью нарушить термодинамический баланс планеты.

Цель

Целью исследования является совершенствование магнитолевитационной технологии на электродинамическом подвесе и обеспечение ее функционирования на основе экологически рациональных энергосистем. Это означает возможность создания на основе магнитолевитационной технологии транспортно-энергетической системы, использующей возобновляемые источники энергии (в частности, фотоэлектрические преобразователи) и подключенной к национальной/локальной энергосетям в качестве потребителя и производителя энергии одновременно.

Рассматриваемая концепция «дороги-электростанции» представляет собой магнитолевитационную транспортную магистраль (рис. 1) с энергообеспечением от солнечной электростанции, размещенной вдоль боковых поверхностей путепровода (см. вставку внизу слева).

Методика

По классификации академика Петра Капицы предлагаемая разработка является пример комплексной научной проблемы, касающейся трех взаимопроникающих технологий: магнитолевитационного транспорта, фотоэлектрического преобразования и фазометрической радионавигации, и для достижения поставленной цели требует системного подхода. Поэтому в качестве методологического инструментария при проведении исследований использовались методы системного анализа, методы декомпозиции и системного анализа, компьютерного моделирования, а также расчетно-статистические методы.

Результаты

Принципиальная осуществимость предложенной концепции энерготранспортной системы следует из приемлемого соотношения между мощностью потока солнечного излучения, достигающего поверхности земли, и энергией, необходимой для работы как самого линейного синхронного электродвигателя, так и других

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

подсистем МАГЛЕВа. При расчете распределенной вдоль МАГЛЕВ-трассы солнечной электростанции исходили из полученного ранее энергетического баланса [1], согласно которому для работы тягово-левитационной системы требуется энергия порядка $123 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км/}$. Она может быть обеспечена путем размещения вдоль каждого погонного метра МАГЛЕВ-магистрали фотоэлектрических панелей, вырабатывающих электроэнергию порядка $157 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$. Расчет энергии, производимой фотоэлектриче-

скими панелями, подробно описанный в [9], с учетом коэффициента полезного действия современных преобразователей солнечного излучения в электроэнергию и погодноклиматических факторов, показал, что для обеспечения суточного энергопотребления погонного метра дороги необходимо разместить на том же метре пути как минимум $4\text{--}5 \text{ м}^2$ горизонтально ориентированных солнечных панелей.

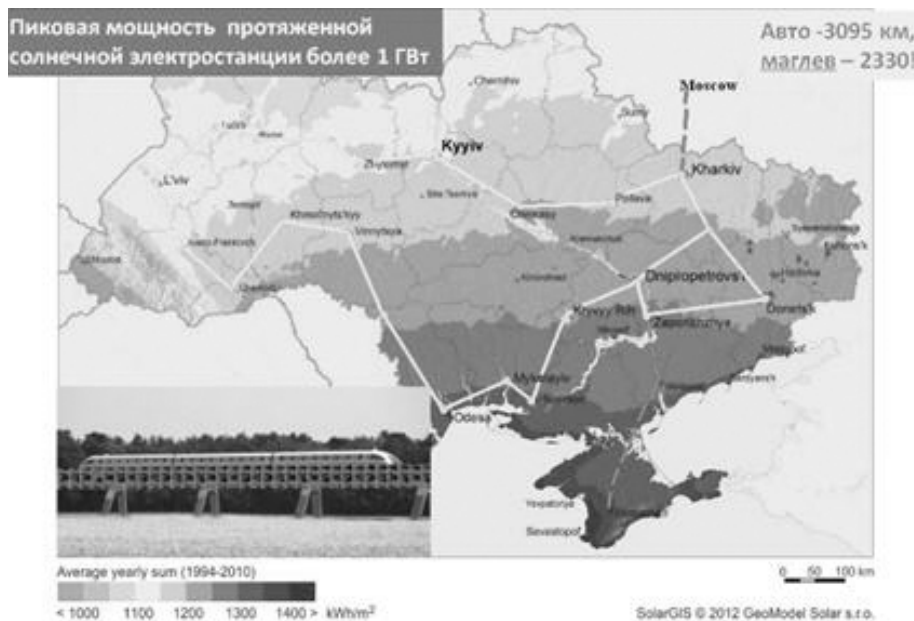


Рис. 1. МАГЛЕВ-магістраль на фоні атласу інсоляції України

Fig. 1. MAGLEV-guideway at the background of insolation atlas of Ukraine

На втором этапе исследований было доказано выполнение баланса между потреблением энергии МАГЛЕВ-транспортом и энергией, производимой фотоэлектрическими панелями, вдоль всей проектируемой магнитолевитационной транспортной магистрали (рис. 1). Прогноз уровней энергообеспеченности разрабатываемой всеукраинской МАГЛЕВ-трассы был осуществлен путем систематизации, анализа и численной обработки статистических данных, полученных от спутниковых изображений поверхности Земли. Крупнейшие базы данных, предоставляющие значения уровня энергии падающего потока солнечного излучения (инсоляции) в открытый доступ, принадлежат американским и западноевропейским организациям. Однако различие технических средств и

методик определения значений солнечной радиации на поверхности Земли приводит к достаточно значимым отличиям в данных. Поэтому очень важно выявить функцию распределения инсоляции по территории Украины. Прделанная авторами статистическая обработка имеющихся в открытом доступе на сайте NASA больших массивов метеорологических данных за период 35 лет позволила установить, что инсоляция наилучшим образом аппроксимируется функцией распределения Джонсона SB. Как показал расчет, солнечный потенциал Украины (см рис. 1) позволяет обеспечить полноценную работу всего электротехнического комплекса высокоскоростного МАГЛЕВ-транспорта, проектируемого через все областные центры Украины исключительно за счет

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

солнечной энергии. До сих пор в транспортной отрасли электроэнергия, полученная в результате преобразования солнечной энергии, использовалась в основном для электроснабжения инфраструктуры, например, для освещения вокзалов (г. Берлин).

Важно при этом, что переход на электропитание МАГЛЕВ-транспорта от распределенной вдоль трассы фотоэлектрической энергосистемы позволяет кардинально перестроить и саму систему управления движением МАГЛЕВ-поездов [7], в результате чего достигается значительное повышение точности позициониро-

вания поездов, движущихся с большими, до 500 км/час, скоростями. Полученное авторами решение запатентовано, опубликовано в специализированных журналах и докладывалось на ряде отечественных и зарубежных научных конференций по навигационным системам, высокоскоростному транспорту и возобновляемой энергетике.

Прецизионная система управления МАГЛЕВом с электропитанием от солнечной энергии в схематическом виде представлена на рис. 2.

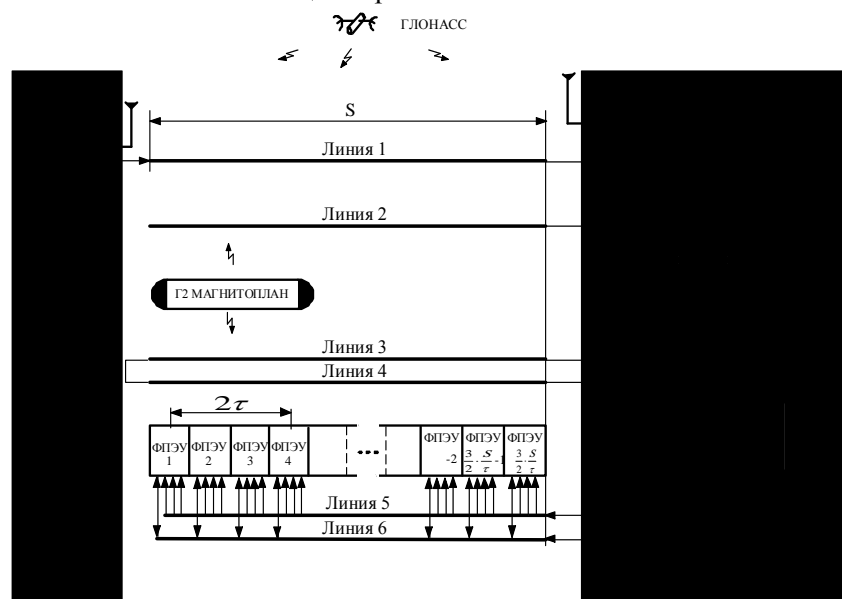


Рис. 2. Фазометрическая радионавигационная система управления движением магнитоплана

Fig. 2. Phase-metrical radio-navigational system of magnetoplan movement control

Важная роль при построении энергосистем на ВИЭ отводится накопителям электроэнергии, которые не только позволяют обеспечивать *автономность* энергоснабжения, но и вообще представляют собой ключевое звено в энергосистеме. Введение подсистемы накопления энергии позволило преодолеть препятствия на пути реализации предложенной концепции, связанные с характерной особенностью солнечного источника энергоснабжения – непостоянством генерируемой мощности. Однако следует отметить, что роль указанной неопределенности несколько преувеличена. Энергию ветра и солнца следует признать не только изменчивой, но и предсказуемой, так как имеется возможность достаточно точно прогнозировать,

насколько ветреной и солнечной будет погода в течение определенного срока, например, ближайших двух дней.

Такая подсистема, кроме обеспечения необходимых энергозатрат МАГЛЕВ-дороги, будучи включенной в локальные интеллектуальные энергосистемы (SMART-grid), может также создать ценный ресурс для оптимизации энергопотребления прилегающих к магистрали территорий.

Для повышения эффективности энергосистем на возобновляемых источниках энергии, в частности солнечных, авторами был проведен цикл исследований, направленных на улучшение характеристик компонентов энергосистем и сбалансированности систем в целом. В частно-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

сти, было осуществлено компьютерное моделирование солнечных модулей перспективных конструкций по методике, описанной в [6, 12].

Было показано [8], что для упрощения требований к монтажу солнечных батарей под строго определенным углом к горизонту следует использовать солнечные батареи на основе аморфного кремния, которые, к тому же, имеют еще ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с фотоэлектрическими преобразователями на основе кристаллического или поликристаллического кремния. Тонкопленочные солнечные батареи на аморфном кремнии, обладая меньшей температурной и угловой чувствительностью и повышенной эффективностью работы в рассеянном свете, обеспечивают годовую выработку электроэнергии на 15–20 % выше по сравнению с модулями из монокристаллического кремния, размещенными на больших площадях при одинаковых установленных мощностях и одинаковых условиях эксплуатации. Общая установленная мощность солнечной электростанции вдоль разрабатываемой МАГЛЕВ-трассы составляет около 1 ГВт.

Широкое внедрение тонкопленочных солнечных батарей на аморфном кремнии на энергетический рынок предполагается с 2030 года, когда будет построено достаточное количество фабрик по их производству. Естественно, представляет большой интерес запуск в Украине собственного серийного производства солнечных модулей. Проект такой фабрики, рассчитанный на производство в г. Днепр фотоэлектрических модулей производительностью 35 МВт/год, разработан учеными нашего Института совместно со специалистами МНПК «ВЕСТА». Этот проект предполагает привлечение транснациональной инжиниринговой фирмы «M+W Group» со штаб-квартирой в Штутгарте (ФРГ), имеющей опыт строительства производственных комплексов модульного типа.

Осуществление этого проекта могло бы стать толчком для роста всей экономики Украины, так как повлекло бы за собой развитие смежных отраслей (например, получение газа силана, являющегося сырьем для производства фотомодулей, на Запорожском заводе «Полупроводник»), а также расширение производства

электротехнических компонентов и, конечно же, создание новых рабочих мест.

Перспективным направлением в развитии предлагаемой энерготранспортной системы «МАГЛЕВ-дорога – солнечная электростанция» является подключение к ней орбитального фрагмента, передающего преобразованную в СВЧ-луч солнечную энергию с орбитальной платформы на земную поверхность. Использование солнечных космических электростанций (СКЭС), вследствие выноса их за пределы земной атмосферы [2], признано действенным способом повышения стабильности энергопоступления.

При существующем развитии космических технологий сооружение СКЭС потребует весьма затратной инфраструктуры по созданию и поддержанию космической системы в эксплуатации. Однако, с учетом последних достижений в физике полупроводников и радиофизике и с применением единой элементной базы СКЭС на основе полупроводниковых технологий и микроэлектроники сверхвысоких частот (СВЧ), можно значительно уменьшить вес и размеры устройств, выводимых на орбиту, и тем самым снизить стоимость такой разработки. С этих позиций весьма привлекательным выглядит применение в качестве малогабаритных генераторов СВЧ-колебаний твердотельных диодов Ганна как основных компонентов СКЭС для преобразования постоянного тока в высокочастотные колебания с последующей передачей энергии на Землю по микроволновому лучу.

Одним из вариантов усовершенствования конструкции диодов Ганна является применение катодов, *инжектирующих* «горячие» электроны в пролетную область. В ходе проведенного исследования с использованием компьютерного моделирования было установлено, что в качестве такого инжектора может быть использована многослойная *InAlGaAs*-структура, образующая барьер, соответствующий энергетическому интервалу междолинного перехода.

Важным элементом космического фрагмента поставки энергии активному МАГЛЕВ-путепроводу является электродинамическая система для излучения и фокусировки микроволнового луча, результаты моделирования которой приведены на рис. 3.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

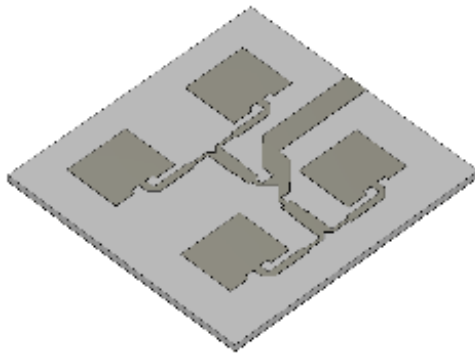
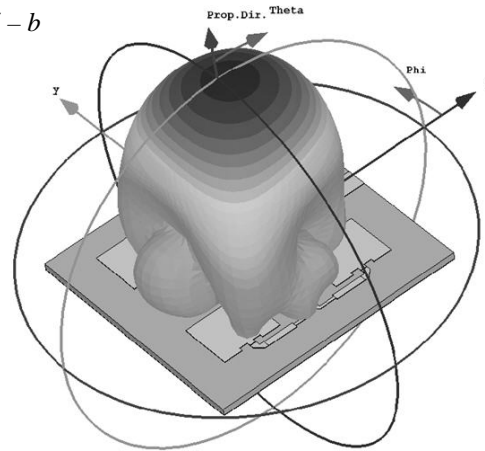
a – a*б – б*

Рис. 3. Моделирование электродинамической системы для излучения и фокусировки микроволнового луча:
a – базовый элемент микрополосной антенной решетки; *б* – трехмерная диаграмма антенной решетки

Fig. 3. The modelling of the electrodynamic system for the radiation and focusing of microwave beam:
a – base element of microstrip antenna array; *b* – three-dimensional diagram of antenna array directivity

Моделирование осуществлялось с использованием программного пакета CST Microwave Studio. Зависимость общей эффективности от частоты резонансного характера, с максимумом 93,2 % вблизи частоты 95 ГГц, является следствием того, что элементы согласования схемы настроены именно на эту рабочую частоту. Выбор такой рабочей частоты определяется тем, что она лежит в середине второго атмосферного окна прозрачности, и это позволяет обеспечить минимальные потери мощности при прохождении энергетического луча через земную атмосферу.

После трансляции потребует своего решения задача обратного преобразования энергии принятого наземной ректенной микроволнового луча в ток промышленной частоты. С этой целью было разработано соответствующее устройство преобразования СВЧ-энергии в переменный ток, использующее явление внешнего отрицательного дифференциального сопротивления, проявляющегося в объемных полупроводниковых структурах в сильных электрических полях [5].

Для повышения предельного уровня принимаемой мощности возможно параллельное соединение модулей-преобразователей (причем, во избежание переотражения излучения СВЧ-мощности от не полностью согласованной с волноводной линией полупроводникового элемента преобразователь может быть построен по

мостовой схеме) [3]. При этом мостовая схема позволяет преобразовать в тепло ту часть СВЧ-мощности, которая не участвует в преобразовании в ток промышленной частоты, благодаря чему возможно полное использование СВЧ-мощности, поступающей с орбитальной фото-СВЧ-энергоустановки. Следовательно, можем считать, что обоснован новый подход к разработке элементной базы СКЭС – на основе единых по своей природе полупроводниковых технологий и микроэлектроники сверхвысоких частот.

В результате проведенных исследований изучены особенности работы магнитолевитационного транспорта на электродинамическом подвесе и разработаны физико-технические основы создания единого комплекса – «МАГЛЕВ-дорога – распределенная фотоэлектрическая система».

Научная новизна и практическая значимость

Эти результаты позволяют впервые обеспечить всепогодное гарантированное электропитание МАГЛЕВ-магистрали на основе солнечной электростанции, которая, будучи при этом подключенной к локальным интеллектуальным энергосистемам по технологии SMART-grid, позволяет еще и оптимизировать энергопотребление прилежащих к высокоскоростной магистрали территорий.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Выводы

Таким образом, можем сделать обобщающий вывод о том, что цель работы достигнута и эти результаты, в совокупности с разработанным ранее учеными ИТСТ НАН Украины «Трансмаг» во взаимодействии со специалистами Международной научно-промышленной корпорации «ВЕСТА» (г. Днепр) проектом се-

рийного производства в Украине солнечных батарей на основе аморфного кремния производительностью 35 МВт/год, открывают возможности к осуществлению в Украине межотраслевого инновационного проекта общенационального масштаба по созданию высокоскоростных наземных транспортных коридоров на экологически рациональных энергосистемах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бочаров, В. И. Транспорт на сверхпроводящих магнитах / В. И. Бочаров, И. В. Салли, В. А. Дзензерский. – Ростов-на-Дону : Изд-во Рост. ун-та, 1988. – 152 с.
2. Ванке, В. А. СВЧ-электроника – перспективы в космической энергетике // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – № 5. – С. 98–102.
3. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. пособие для высш. учеб. заведений / И. С. Гоноровский, М. П. Демин. – Москва : Сов. радио, 1994. – 479 с.
4. Мямлин, С. В. Прогресс транспорта – залог развития национальной экономики / С. В. Мямлин // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 1 (43). – С. 7–12. doi: 10.15802/stp2013/9786.
5. Пат. 92531 Україна, МПК (2009) H 01 Q 1/24 (2006.01), H 01 Q 21/06 (2006.01), H 01 P 1/00, H 03 B 9/00, H 01 L 35/00. Пристрій перетворення НВЧ енергії в змінний струм промислової частоти / Дзензерський В. О., Соколовський І. І., Бровкін Ю. М., Кравченко О. В., Плаксін С. В., Погоріла Л. М.; заявник та патентовласник Ін-т трансп. систем і технологій нац. акад. наук України «Трансмаг». – № a200815171 ; заявл. 29.12.2008 ; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21. – 1 с.
6. Польский, Б. С. Численное моделирование полупроводниковых приборов / Б. С. Польский. – Рига : Зинатне, 1986. – 168 с.
7. Системы управления и энергообеспечения магнитолевитирующего транспорта / В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Л. М. Погорелая, В. Г. Толдаев, Ю. В. Шкиль. – Киев : Наук. думка, 2014. – 276 с.
8. Чопра, К. Тонкопленочные солнечные элементы : [пер. с англ.] / К. Чопра, С. Дас. – Москва : Мир, 1986. – 435 с.
9. Active Maglev guideway as electricity generating and distributing facility [Электронный ресурс] / V. A. Dzenzerskiy, N. M. Khachapuridze, S. V. Plaksin, V. G. Toldayev, Yu. V. Shkil // Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment. – Paris, 2014. – Режим доступа: <https://trid.trb.org/view/1327840>. – Загл. с экрана. – Проверено : 04.01.2018.
10. FP6 Instruments. Implementing the Priority. Thematic Areas of the Sixth Frame Program of European Community Research. – Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2002. – 14 p.
11. Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage / S. Weitemeyer, D. Kleinhans, T. Vogt, C. Agert // Renewable Energy. – 2015. – Vol. 75. – P. 14–20. doi: 10.1016/j.renene.2014.09.028.
12. Simulating Solar Cell Devices Using Silvaco TCAD // Simulation Standard. – 2008. – Vol. 18, No. 2. – P. 1–3.
13. Study of Photovoltaic Systems' Performances with Different Module Types / Z. Zarkov, L. Stoyanov, H. Kanchev, V. Milenov, V. Lazarov // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 856. – P. 279–284. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.856.279.
14. Suberu, M. Y. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency / M. Y. Suberu, M. W. Mustafa, N. Bashir // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 35. – P. 499–514. doi: 10.1016/j.rser.2014.04.009.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

В. О. ДЗЕНЗЕРСЬКИЙ¹, О. Б. ГНИЛЕНКО², С. В. ПЛАКСИН³, Л. М. ПОГОРІЛА^{4*},
Ю. В. ШКІЛЬ⁵

¹Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 22 03, ел. пошта vad@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-5504-4524

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38(056) 370 21 82, ел. пошта gnilenko@ua.fm, ORCID 0000-0002-1380-1195

³Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{4*}Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта plm@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-3718-0733

⁵Інститут транспортних систем і технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта siv@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

ПЕРСПЕКТИВНА ТРАНСПОРТНО-ЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОЗПОДІЛЕНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Мета. Основною метою дослідження є вдосконалення магнітолевітаційної технології з використанням електродинамічного підвісу та забезпечення її функціонування на основі екологічно раціональних енергосистем. Це означає можливість створення на основі магнітолевітаційної технології транспортно-енергетичної системи, що використовує відновлювані джерела енергії (зокрема, фотоелектричні перетворювачі) та підключена до національної/локальної енергомереж як споживач і виробник енергії одночасно. **Методика.** Проведене дослідження, аналіз та узагальнюючі висновки базуються як на результатах робіт із даної тематики, так і на власних напрацюваннях авторів. При проведенні досліджень застосовувалися методи системного аналізу та комп'ютерного моделювання компонентів великої кіберфізичної транспортно-енергетичної системи. **Результати.** Розроблені фізико-технічні основи створення перспективної транспортно-енергетичної системи, яка включає високошвидкісний наземний транспорт на електродинамічному підвісі та розподілений фотоелектричний енергокомплекс, адаптований до особливостей роботи даного виду транспорту і гарантуючий його надійне функціонування в будь-яких погодних умовах. **Наукова новизна.** Вперше обґрунтована можливість створення єдиного транспортного комплексу, об'єднуючого в собі швидкісну магнітолевітаційну систему та розподілену систему електроживлення на основі сонячної енергії. Вона одночасно є невід'ємною частиною прецизійної швидкодійної системи управління, що працює у режимі реального часу. **Практична значимість.** Запропоноване науково-технічне рішення дозволяє на основі відновлюваного джерела енергії розв'язати проблеми електроживлення та управління високошвидкісним транспортом. А за рахунок включення розподіленої системи електроживлення в локальні інтелектуальні енергосистеми за технологією SMART-grid дає можливість оптимізувати енергоспоживання територій, по яких проходить магістраль високошвидкісного транспорту.

Ключові слова: магнітолевітаційний (МАГЛЕВ) транспорт; розподілена система електроживлення; сонячна енергія; прецизійна швидкодійна система управління

V. O. DZENZERSKIY¹, A. B. GNILENKO², S. V. PLAKSIN³, L. M. POGORELAYA^{4*},
Y. V. SHKIL⁵

¹Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine, Pisargevskiy St., 5, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 370 22 03, e-mail vad@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-5504-4524

²Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine, Pisargevskiy St., 5, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail gnilenko@ua.fm, ORCID 0000-0002-1380-1195

³Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine, Pisargevskiy St., 5, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{4*}Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine, Pisargevskiy St., 5, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail plm@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-3718-0733

⁵Institute of Transport Systems and Technologies of NAS of Ukraine, Pisargevskiy St., 5, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail siv@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

PERSPECTIVE TRANSPORT-POWER SYSTEM BASED ON THE INTEGRATION OF MAGLEV-TECHNOLOGY AND DISTRIBUTED PHOTO-ELECTRIC STATION

Purpose. The research main purpose is the perfection of magnetolevitating technology on electrodynamic suspension and providing its functioning on the base of ecologically rational energy systems. It means creation of the MAGLEV transport-power system which uses renewable energy sources (in particular, photoelectric converters) and connected to national/local networks as an energy user and producer simultaneously. **Methodology.** Conducted research, analysis and summary conclusions are based both on the results of works on the given subject, and own works of authors. The methods of systems analysis and computer design of components of the large cyber-physical transport-power system were used during conducting research. **Findings.** The physical-technical foundations of conception of the perspective transport-power system, including high-speed ground vehicle on electrodynamic suspension and distributed photo-electric energy complex were developed. It adapts to the performance of the given transport type and guaranteeing its safe functioning in any weather terms. **Originality.** For the first time authors substantiated the possibility for creation of single transport complex uniting the speed magnetolevitating system and distributed power supply system on the base of sun energy. It is simultaneously the inalienable part of the precision fast-acting control system, working in the real-time mode. **Practical value.** The offered scientific-technical solution allows on the base of renewable energy source to solve the problems of power supply and a high-speed transport control. Due to the inclusion of the distributed power supply system into local intellectual networks on the SMART-grid technology it gives the possibility to optimize energy consumption of territories neighboring to high-speed way.

Keywords: magnetolevitating (MAGLEV) transport; distributed power supply system; sun energy; precision fast-acting control system

REFERENCES

1. Bocharov, V. I., Sally, I. V., & Dzenzerskiy, V. A. (1988). *Transport na sverkhprovodyashchikh magnitakh*. Rostov-on-Don: Izdatelstvo rostovskogo universiteta. (in Russian)
2. Vanke, V. A. (2007). Millimeter Wave Electronics. Prospects for Space Energy. *Electronics: Science, Technology, Business*, 5, 98-102. (in Russian)
3. Gonorovskiy, I. S., & Demin, M. P. (1994). *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: Uchebnoe posobie dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy*. Moscow: Sovetskoe radio. (in Russian)
4. Myamlin, S. V. (2013). Transport progress as a pledge of national economy development. *Science and Transport Progress*, 1(43), 7-12. doi: 10.15802/stp2013/9786. (in Russian)
5. Dzenzerskiy, V. O., Sokolovskiy, I. I., Brovkin, Y. M., Kravchenko, O. V., Plaksin, S. V., & Pohorila, L. M. (2010). *UA Patent No. 92531*. Kyiv: Derzhavnyi departament intelektualnoi vlasnosti. (in Ukrainian)
6. Polskiy, B. S. (1986). *Chislennoe modelirovaniye poluprovodnikovyykh priborov*. Riga: Zinatne. (in Russian)
7. Dzenzerskiy, V. A., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., Toldaev, V. G., & Shkil, Yu. V. (2014). *Sistemy upravleniya i energoobespecheniya magnitolevitiruyushchego transporta*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
8. Chopra, K., & Das, S. (1986). *Tonkoplennochnye solnechnye elementy: Perevod s angliyskogo*. Moscow: Mir. (in Russian)
9. Dzenzerskiy, V. A., Khachapuridze N. M., Plaksin, S. V., Toldayev, V. G., & Shkil, Y. V. (2014). Active Maglev guideway as electricity generating and distributing facility. *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*. Retrived from <https://trid.trb.org/view/1327840>. (in English)
10. FP6 Instruments. Implementing the Priority (2002). *Thematic Areas of the Sixth Frame Program of European Community Research*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. (in English)
11. Weitemeyer, S., Kleinhans, D., Vogt, T., & Agert, C. (2015). Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage. *Renewable Energy*, 75, 14-20. doi: 10.1016/j.renene.2014.09.028. (in English)
12. Simulating Solar Cell Devices Using Silvaco TCAD (2008). *Simulation Standard*, 18(2), 1-3. (in English)
13. Zarkov, Z., Stoyanov, L., Kanchev, H., Milenov, V., & Lazarov, V. (2016). Study of Photovoltaic Systems' Performances with Different Module Types. *Materials Science Forum*, 856, 279-284. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.856.279. (in English)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

14. Suberu, M. Y., Mustafa, M. W., & Bashir, N. (2014). Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 499-514. doi: 10.1016/j.rser.2014.04.009. (in English)

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Украина)

Поступила в редколлегию: 09.10.2017

Принята к печати: 08.01.2018

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

УДК 629.421.5:004.94

І. А. КЛЮШНИК^{1*}

^{1*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Мета. Стаття ставить за мету визначення раціональних параметрів інтерфейсів передачі даних інформаційно-вимірювальної системи випробувань гідравлічних передач тепловозів, а також знаходження ступеня відмовостійкості в різних режимах роботи системи. **Методика.** У роботі дослідником були визначені та теоретично розраховані основні характеристики каналів передачі даних від апаратних перетворювачів сигналів аналогових датчиків технологічних параметрів до комп'ютера. Для більш повної оцінки в середовищі MATLAB було створено імітаційну модель у рамках дослідження поставленої задачі. Аналіз результатів теоретичних розрахунків та показників, отриманих за допомогою імітаційної моделі з метою визначення раціональних налаштувань інтерфейсів (швидкості передачі, елементної бази, структури системи тощо) передачі даних, дозволяє визначити необхідні характеристики системи. **Результати.** Для існуючої інформаційно-вимірювальної системи випробувань гідравлічних передач тепловозів були проведені дослідження з метою визначення та розрахунку основних характеристик каналів передачі даних від апаратних перетворювачів сигналів аналогових датчиків технологічних параметрів до комп'ютера. Для дослідження тахометричної підсистеми було створено імітаційну модель, яка дозволила дослідити основні характеристики каналів передачі даних від апаратних перетворювачів сигналів аналогових датчиків тахометричних параметрів до комп'ютера. Був проведений аналіз даних, отриманих за результатами теоретичних розрахунків і за допомогою імітаційної моделі, та визначені шляхи раціонального налаштування їх передачі. **Наукова новизна.** Дослідження та теоретичні розрахунки основних характеристик каналів передачі даних від апаратних перетворювачів сигналів аналогових датчиків до комп'ютера показали, що система працює у режимі фактичної «відмови від обслуговування». Для більш детальних досліджень процесів, що протікають у системі передачі тахометричних даних, у середовищі MATLAB була створена імітаційна модель, яка дозволила провести ряд експериментів. **Практична значимість.** На основі експериментів із моделлю були встановлені раціональні шляхи розв'язання існуючої проблеми: роботи системи в режимі фактичної «відмови від обслуговування». Також впровадження одного із запропонованих способів вирішення проблеми або їх комбінування потребують подальших досліджень у реальній системі.

Ключові слова: імітаційна модель; MATLAB; SIMULINK; гідравлічна передача; випробування гідропередач; випробувальний стенд; інформаційно-вимірювальна система

Вступ

Більшості локомотивів із гідравлічною передачею потужності, які використовуються на території України, необхідно проведення капітального або капітально-відновлюваного ремонту. При виконанні капітального ремонту од-

ним із складних і відповідальних вузлів тепловоза є гідравлічна передача. Після капітальних ремонтів гідравлічних передач тепловозів проводяться їх випробування без навантаження з метою припрацювання деталей, а також випробування під навантаженням із метою перевірки основних параметрів. За технічними умо-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

вами підприємств, що ремонтують гідравлічні передачі, рекомендується проведення певного обсягу оціночних і регулювальних випробувань гідравлічних передач тепловозів із метою контролю їх післяремонтного стану. Згідно з правилами ремонту в процесі обкатки гідравлічних передач тепловозів без навантаження та з навантаженням в основному контролюється рівень шуму, герметичність, температурні режими, тиск у масляних системах, розгін турбінного валу, спрацювання блокувальних пристроїв, вмикання муфт реверсу і режимів, величина вібрації корпусу, надійність і чіткість роботи системи автоматичного управління [5].

В Україні сьогодні для виконання заводських випробувань гідравлічних передач тепловозів використовуються типові стенди, які не в повній мірі відповідають сучасним вимогам до випробувань. Звичайно, дані стенди за кількістю контрольних параметрів і точністю вимірювання (у переважній більшості застосовуються стрілочні аналогові індикатори) не відповідають сучасному рівню розвитку обчислювальної техніки, а саме: не дозволяють фіксувати динаміку процесів. Відсутність автоматичної фіксації вимірюваних параметрів та протоколу випробувань зменшує можливості аналізу результатів випробувань і випробувальних стендів у цілому.

Для отримання більш повної інформації про технічний стан гідравлічної передачі під час випробувань необхідно застосовувати нові методи та засоби випробувань. Відповідно до вимог розробленої методики при визначенні механічних втрат у гідравлічних передачах під час стендових випробувань [3] необхідно забезпечити високу точність вимірювання частоти обертання турбінного колеса гідравлічної передачі.

Мета

Проведені дослідження ставили за мету визначити раціональні параметри інтерфейсів передачі даних інформаційно-вимірювальної системи випробувань гідравлічних передач, а також визначити ступінь відмовостійкості в різних режимах роботи системи.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначення та розрахунок основних характеристик каналів передачі даних від апаратних перетворювачів даних сигналів аналогових датчиків технологічних параметрів до комп'ютера;

- створення імітаційної моделі для дослідження основних характеристик каналів передачі даних від апаратних перетворювачів даних сигналів аналогових датчиків технологічних параметрів до комп'ютера;

- аналіз отриманих за результатами теоретичних розрахунків та за допомогою імітаційної моделі даних із метою визначення раціональних налаштувань інтерфейсів (швидкості передачі, елементної бази, структури системи тощо) передачі даних.

Методика

Спрощена схема інформаційних потоків даних інформаційно-вимірювальної системи випробувань гідравлічних передач тепловозів показана на рис. 1.

Як видно з рис. 1 та за [5], система опрацьовує інформацію від трьох датчиків частоти обертання, які обробляють три мікроконтролери ATMEGA 8, що послідовно передають по ланцюжку за допомогою інтерфейсу UART розрахункові дані частоти обертів, отримані на основі сигналу від відповідних датчиків частоти обертання. Для передачі даних до комп'ютера останній (третій в ланцюжку) мікроконтролер передає послідовно як свої дані вимірюваної частоти обертів, так і дані інших двох єдиним пакетом даних за допомогою перетворювача з UART на USB FT232RL.

Дані інших десяти параметрів (температура масла в колі циркуляції першого та другого гідротрансформаторів, температура масла до та після гідропередачі, тиск масла в колі циркуляції першого та другого гідротрансформаторів, струм та напруга приводного електродвигуна та навантажувального генератора) обробляються за допомогою індикаторів технологічних параметрів «МикРА ІЗ» (для температури, струму, напруги) та «МикРА І4» (для тиску), які передаються по загальній шині на базі RS-485 за допомогою протоколу канального рівня MODBUS RTU.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ



Рис. 1. Спрощена схема інформаційних потоків даних інформаційно-виміральної системи випробувань гідравлічних передач тепловозів

Fig. 1. Simplified scheme of information data flows of information-measurement system for tests of locomotive hydraulic gears

Протокол MODBUS RTU [8] потребує значних часових затримок (до 1,75 мс міжкадрові затримки та до 9 байт в кожному кадрі), також для отримання даних потрібно відправити кадр-запит та отримати кадр-відповідь від відповідного пристрою. Самими швидкоплинними процесами в системі є перехідні процеси струму та напруги на двигуні та генераторі. Як показують дослідження [4], спектр перехідного процесу містить максимальну частоту 1,22 Гц. Для того, щоб відтворити такий сигнал за теоремою Найквіста-Котельникова, необхідно вести опитування датчиків із вдвічі більшою частотою, тобто 2,4 Гц. Для забезпечення повного відтворення струмів і напруг, а також інших параметрів, що обробляються за допомогою індикаторів технологічних параметрів (адже інші параметри не можуть змінитися швидше, ніж струм або напруга на двигуні), цілком достатньо застосовувати протокол MODBUS RTU з використовуваною швидкістю передачі даних у 9 600 бод, що дозволить вести фіксацію даних від 10 датчиків із частотою близько 14 Гц.

Як свідчать дослідження [1] в заводських умовах (подібних до тепловозоремонтного заводу), можуть виникати електромагнітні завади в діапазоні від 600 до 1 200 кГц. Тому вплив на спотворення даних при передачі мінімальний, адже на таких високих частотах дані не фіксуються системою. І навіть при надходженні спотворених даних – такі дані будуть проігноровані, оскільки CRC – сума такого кадру даних – буде неправильною. Також такі перешкоди носять не постійний характер, оскільки здебільшого в умовах заводу постійно проходять перехідні процеси, які пов'язані з вмиканням різних потужних споживачів.

З точки зору передачі даних вимірюваних десяти параметрів (температури масла в колі циркуляції першого та другого гідротрансформаторів, температури масла до та після гідропередачі, тиску масла в колі циркуляції першого та другого гідротрансформаторів, струму та напруги приводного електродвигуна та навантажувального генератора) – передача їх за допомогою «МикРА ІЗ» (для температури, струму, напруги) та «МикРА І4» (для тиску) і передачі

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

їх до комп'ютера за допомогою перетворювача з RS-485 на USB FT232RL є досить надійними – з точки зору завантаження середовища передачі даних (завдяки застосуванню протоколу MODBUS RTU) [8], та мають раціональну частоту опитування, що значно перевищує розрахункову. Тому подальший розрахунок та вибір оптимальних параметрів у даному випадку – недоцільний, адже через затримки при передачі даних по протоколу MODBUS RTU, а також одночасну роботу лише з одним екземпляром «МикРА ІЗ» або «МикРА І4» будь-які можливі колізії у системі зводяться практично до нуля.

Тому розглянуто більш детально характеристики каналів передачі даних від апаратних перетворювачів (мікроконтролерів) даних сигналів аналогових датчиків технологічних параметрів (тахометричних) до комп'ютера. Програми усіх трьох мікроконтролерів виконують передачу зі швидкістю 9 600 бод. Мікроконтролери мають буфери приймачів UART, рівні 2 байтам. Мікросхема-перетворювач FT232RL має буфер приймача, рівний 128 байт. Дані в ланцюжках передаються в мікроконтролерах одразу після надходження або після завершення вимірювання відповідним мікроконтролером. Тому затримки при прийомі, формуванні нових даних і відправці практично досить невеликі, ними можна знехтувати, якщо вони досягають не більше 90 мкс (при максимальних обертах $1\,500\text{ хв}^{-1}$ розбіжність буде складати приблизно 20 хв^{-1} , тобто в рамках статистичної похибки, яка була розрахована в [10]). Оскільки самим слабким місцем системи (найбільш навантаженим) буде передача даних із третього мікроконтролера до мікросхеми-перетворювача FT232RL, то було виконано розрахунок часу передачі даних від цього мікроконтролера та частоти формування імпульсів від датчика. Були прийняті такі допущення:

– мікроконтролер передає дані зі швидкостями 9 600, 19 200, 38 400, 115 200, 250 000, 1 000 000 бод;

– виконується розрахунок у разі надходження сигналу від оптичного датчика на 10 зубців за формулою:

$$\tau = \frac{1}{\omega N} \cdot 60, \quad (1)$$

де, τ – період сигналу, с; ω – виміряна частота обертання, хв^{-1} ; N – кількість зубців диска датчика;

– виконується розрахунок у разі надходження сигналу від тахогенератора змінного струму і/або оптичного фотодатчика за час повного обертання датчика на 10 зубців за формулою:

$$\tau = \frac{1}{\omega} \cdot 60, \quad (2)$$

– виміряні дані передаються двома байтами від кожного мікроконтролера, а на початку і в кінці передачі подаються з метою синхронізації по одному службовому байту відповідно (тобто виконується передача посилки даних (кадрів), які рівні 8 байтам);

– максимальна частота обертання становить $1\,500\text{ хв}^{-1}$;

– у разі відсутності нових даних на момент відправки замість них відправляється два службові байти-пустушки.

– структура кадру наступна: початковий службовий байт, 2 байти даних від першого датчика або два службові байти-пустушки, два байти даних від другого датчика або два службові байти-пустушки, два байти даних від третього датчика або два службові байти-пустушки.

Звичайно, можливо оцінити можливість передачі повного кадру даних при різних швидкостях передачі даних та алгоритмах обробки при умові, що максимально можлива частота обертання – $1\,500\text{ хв}^{-1}$. Беручи до уваги формулу (1), можна отримати наступну формулу:

$$P = \frac{\frac{1}{\omega N} \cdot 60}{\frac{K}{V_n}}, \quad (3)$$

де P – кількість переданих кадрів; K – кількість байт у кадрі; V_n – швидкість передачі, бод.

Аналогічним чином, використовуючи формулу (2), можна отримати:

$$P = \frac{\frac{1}{\omega} \cdot 60}{\frac{K}{V_n}}, \quad (4)$$

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

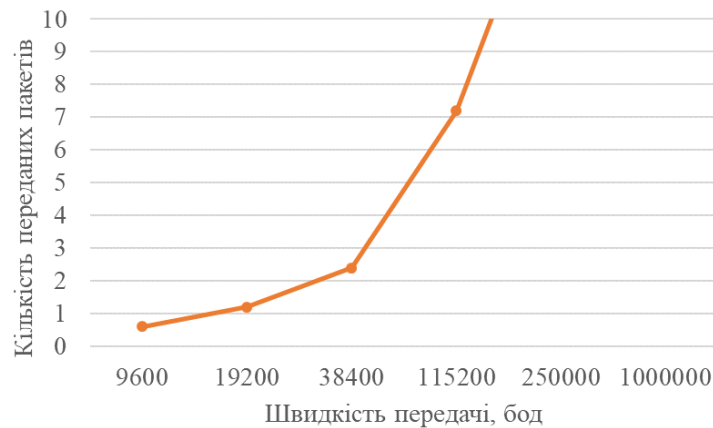


Рис. 2. Залежність кількості переданих пакетів даних (розміром швидкості у 8 байт) за 1/10 обертання валу при швидкості 1 500 хв⁻¹

Fig. 2. Dependence of number of transmitted data packets (speed size of 8 bytes) for 1/10 shaft rotation at a speed of 1 500 min⁻¹

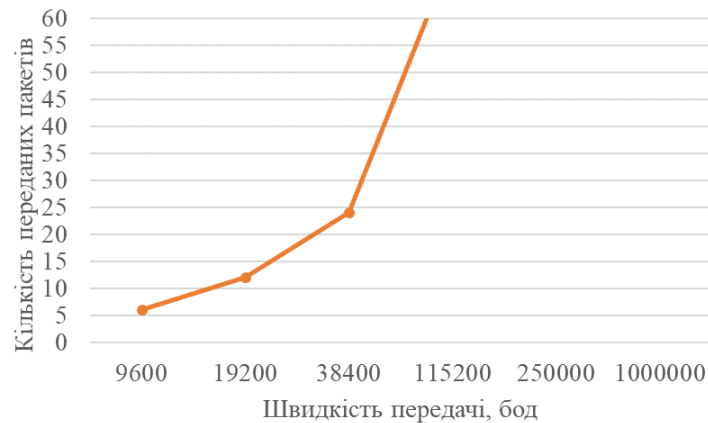


Рис. 3. Залежність кількості переданих пакетів даних (розміром швидкості у 8 байт) за повне обертання валу при швидкості 1 500 хв⁻¹

Fig. 3. Dependence of number of transmitted data packets (speed size of 8 bytes) for full shaft rotation at a speed of 1 500 min⁻¹

Як видно з рис. 2, при алгоритмі обробки даних від датчика за 1/10 обертання поточної швидкості 9 600 бод явно недостатньо для передачі кадру даних від усіх трьох датчиків за умов максимальної частоти обертання. Схожа тенденція також демонструється на рис. 3 (на якому показано кількість переданих пакетів даних за один оберт валу при максимальній швидкості). Але в даному випадку можливо передати до 5 кадрів, що є цілком достатнім для роботи системи.

Для більш повного дослідження процесів у підсистемі вимірювання частот обертання була

створена імітаційна модель в середовищі MATLAB SIMULINK із застосуванням SimEvents.

Дана модель виконує розрахунок за алгоритмом, запропонованим автором у [9]. У даному алгоритмі час обертання зі швидкістю до 80 хв⁻¹ складає величину, яку можливо розрахувати за формулою (2), а для швидкості, що перевищує 80 хв⁻¹ – за формулою (1). Час опитування FT232RL дорівнює 0,4 с.

Структурно модель показано на рис. 4.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

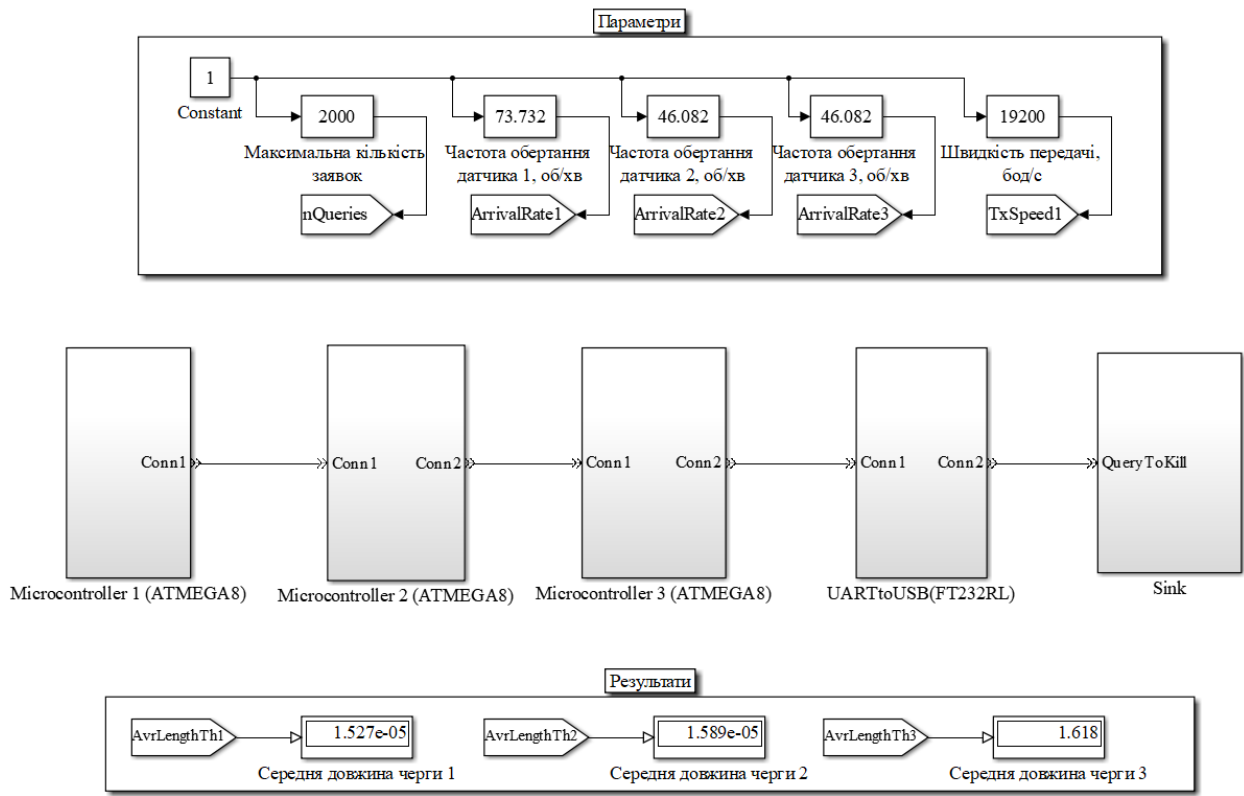


Рис. 4. Структурна схема СМО в середовищі MATLAB

Fig. 4. Structural diagram of queue system (QS) in MATLAB environment

Було проведено серію експериментів при максимальній швидкості $1\,500\text{ хв}^{-1}$ та різних (які підтримуються як приймачами, так і передавачами) швидкостях: від 9 600 до 1 000 000 бод, при варіаціях часу опитування мікросхеми-перетворювача FT232RL (від 0,4 до

0,1 с), а також за умов розрахунку частоти обертання за 1/10 обертання на всіх валах і за умов розрахунку частоти обертання за одне повне обертання на всіх валах. Основний критерій оцінки – середня довжина черги (занятість буфера FT232RL).

Рис. 5. Залежність середньої довжини черги від швидкості передачі за 1/10 обертання всіх валів при частоті обертання $1\,500\text{ хв}^{-1}$, при часі опитування FT232RL 0,4 с.Fig. 5. Dependence of the average queue length on the transmission speed for 1/10 rotation of all shafts at a rotational speed of $1\,500\text{ min}^{-1}$ at the polling time of FT232RL 0.4 sec.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

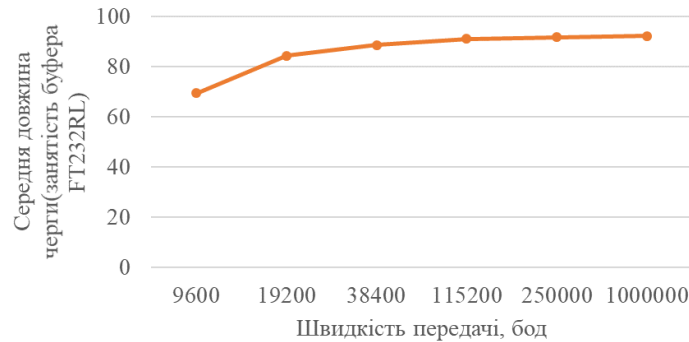


Рис. 6. Залежність середньої довжини черги від швидкості передачі за 1/10 обертання всіх валів при частоті обертання $1\,500\text{хв}^{-1}$, при часі опитування FT232RL 0,1 с.

Fig. 6. Dependence of the average queue length on the transmission speed for 1/10 rotation of all shafts at a rotational speed of $1\,500\text{ minutes}^{-1}$ at the polling time of FT232RL 0.1 sec.

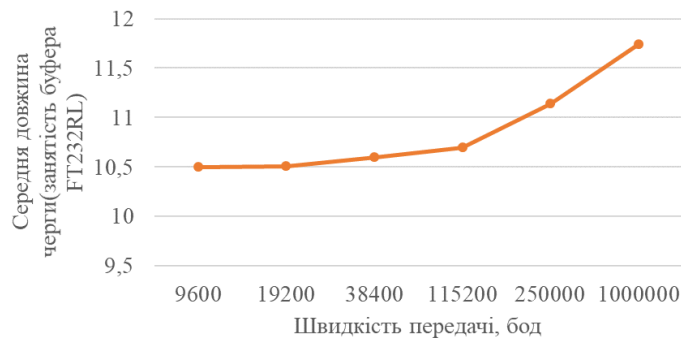


Рис. 7. Залежність середньої довжини черги від швидкості передачі за повне обертання всіх валів при частоті обертання $1\,500\text{хв}^{-1}$, при часі опитування FT232RL 0,1 с.

Fig. 7. Dependence of the average queue length on the transmission speed for the total rotation of all shafts at a rotational speed of $1\,500\text{ min.}^{-1}$ at the polling time of FT232RL 0.1 sec.

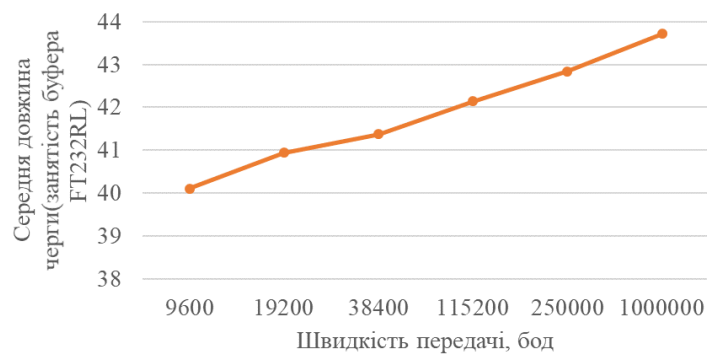


Рис. 8. Залежність середньої довжини черги від швидкості передачі за повне обертання всіх валів при частоті обертання $1\,500\text{хв}^{-1}$, при часі опитування FT232RL 0,4 с.

Fig. 8. Dependence of the average queue length on the transmission speed for the total rotation of all shafts at a rotational speed of $1\,500\text{ min.}^{-1}$ at a polling time of FT232RL 0.4 sec.

Результати основних серій експериментів показано на рис. 5–8.

Як видно з рис. 5–6, при частоті обертання близько $1\,500\text{ хв}^{-1}$ у хоча б одного з датчиків середня зайнятість буфера FT232RL буде прак-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

тично однаковою до максимально можливої швидкості, включаючи 1 000 000 бод, навіть при зменшенні часу опитування FT232RL. Незначний ріст пов'язаний з тим, що експерименти велися з одним максимальним числом заявок, після обробки яких симуляція припинялась. Також зменшення часу опитування нижче 0,0156 с фактично неможливо [2, 6, 7], що пов'язано з точністю роботи таймеру в ОС WINDOWS, на базі якої працює APM, причому буфер буде фактично переповненим, тобто дані не встигають вчасно передаватися і FT232RL буде перевантажений, про що і свідчать на практиці, у процесі експлуатації системи, непоодинокі збої.

Тому необхідно провести ряд додаткових досліджень. Очевидно, необхідно визначити раціональний алгоритм обробки тахометричних даних (за формулою (1) або за формулою (2)). З цією метою було проведено експерименти з деякими модифікаціями моделі (зміна алгоритму обробки сигналів від датчиків, тобто зміни формул розрахунку з (1) на (2)). Результати експериментів показані на рис. 7. Як видно з рис. 7, при застосуванні розрахункової формули (2) частоти обертання, буфер практично не заповнюється на всьому діапазоні швидкостей (при часі опитування 0,1 с.). При збільшенні частоти опитування буфер буде заповнюватися фактично наполовину, про що свідчить рис. 8.

При максимальній швидкості $1\,500\text{ хв}^{-1}$ на всіх трьох датчиках раціонально застосувати таке рішення – зменшити час опитування FT232RL до 0,1 с та змінити алгоритм розрахунку, за якого розрахунок частоти обертання виконувався б із застосуванням формули (2), тобто, за одне повне обертання валу. При такому рішенні швидкість передачі даних можливо залишити 9 600 бод, оскільки в заводських умовах збільшення швидкості передачі може призвести до збільшення помилок у передачі цих даних в умовах перманентних електромагнітних завад.

Результати

Для існуючої інформаційно-вимірювальної системи випробувань гідравлічних передач тепловозів були проведені дослідження з метою визначення та теоретичного розрахунку основ-

них характеристик каналів передачі даних від апаратних перетворювачів даних сигналів аналогових датчиків технологічних параметрів до комп'ютера. Для дослідження тахометричної підсистеми було створено імітаційну модель, яка дозволила дослідити основні характеристики каналів передачі даних від апаратних перетворювачів даних сигналів аналогових датчиків тахометричних параметрів до комп'ютера. Був проведений аналіз отриманих по результатам теоретичних розрахунків та за допомогою імітаційної моделі даних та визначено раціональні налаштування системи (швидкості передачі, часу опитування, алгоритм розрахунку частоти обертання) передачі даних.

Наукова новизна та практична значимість

Дослідження з метою визначення та теоретичного розрахунку основних характеристик каналів передачі даних від апаратних перетворювачів даних сигналів аналогових датчиків технологічних параметрів частоти обертання до комп'ютера показали, що система працює у режимі фактичної «відмови від обслуговування». Для більш детальних досліджень процесів, які протікають у системі передачі тахометричних даних, в середовищі MATLAB була створена імітаційна модель. Дана модель дозволила провести ряд експериментів. На основі експериментів із моделлю були встановлені раціональні шляхи розв'язання існуючої проблеми роботи системи в режимі фактичної «відмови від обслуговування». Також впровадження одного із запропонованих способів вирішення проблеми або їх комбінування потребують подальших досліджень у реальній системі.

Висновки

Були проведені дослідження з метою визначення та теоретичного розрахунку основних характеристик каналу передачі (розмірів буферу, частоти опитування, алгоритму обробки тахометричних даних), що отримані від апаратних перетворювачів даних сигналів аналогових датчиків технологічних параметрів частоти обертання до комп'ютера. Дослідження показали, що система працює в режимі фактичної «відмови від обслуговування» (за існуючого алго-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ритму обробки тахометричних даних [9] та швидкості передачі даних 9 600 бод). Для більш детальних досліджень процесів, які протікають у системі передачі тахометричних даних, в середовищі MATLAB була створена імітаційна модель. Дана модель дозволила провести ряд експериментів із визначення раціональних параметрів системи (розмірів буферу, частоти опитування, алгоритму обробки тахометричних даних). На основі експериментів із моделлю були запропоновані шляхи розв'язання існуючої проблеми. При максимальній швидкості

1 500 хв⁻¹ для всіх трьох датчиків раціонально застосувати таке рішення – зменшити час опитування FT232RL до 0,1 с та змінити алгоритм розрахунку, за якого розрахунок частоти обертання виконувався б із застосуванням формули (2) тобто за один повний оберт валу. При такому рішенні швидкість передачі даних можливо залишити в 9 600 бод, оскільки в заводських умовах збільшення швидкості передачі може призвести до збільшення помилок у передачі даних в умовах перманентних високочастотних електромагнітних завад.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белашов, В. Ю. Мобильный экспериментальный комплекс для исследования электромагнитных полей, генерируемых электрооборудованием и элементами электроэнергетических систем / В. Ю. Белашов, А. И. Асадуллин // Промышленная энергетика. – 2012. – № 8. – С. 52–55.
2. Братуха, М. А. Исследование точности отсчёта временных интервалов в системе windows / М. А. Братуха, О. Г. Шевченко // Информатика та комп'ютерні технології-2012 : матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих науковців / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2012. – С. 59–63.
3. Використання методу вільного вибігу при визначенні механічних втрат в гідравлічних передачах при стендових випробуваннях / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Р. О. Коренюк, І. А. Ключник // Проблеми и перспективы развития ж.-д. транспорта : тез. 77 междунар. науч.-практ. конф. (11–12 мая 2017 г.) / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. – Днепр, 2017. – С. 16–17.
4. Эсауленко, В. А. Методика и алгоритм расчета переходных процессов в двигателе постоянного тока последовательного возбуждения / В. А. Эсауленко, Н. С. Никорюк // Вісн. Кременч. держ. політехн. ун-ту : зб. наук. пр. – Кременчук, 2006. – Вип. 3, ч. 2. – С. 137–139.
5. Information-measuring Test System of Diesel Locomotive Hydraulic Transmissions / I. V. Zhukovytsky, I. A. Kliushnyk, O. B. Ochkasov, R. O. Korenyuk // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 53–65. doi: 10.15802/stp2015/53159.
6. Kołek, K. Windows7 x64 as real-time measurement and control platform / K. Kołek // Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. – T. 89, No. 2 a. – С. 68–71.
7. Sellappan, P. Response Time Considerations in Realtime Software Design / P. Sellappan // Malaysian Journal of Computer Science. – 2017. – T. 9, No. 1. – С. 25–31.
8. Urrea, C. Implementation of error detection and correction in the Modbus-RTU serial protocol / C. Urrea, C. Morales, J. Kern // Intern. J. of Critical Infrastructure Protection. – 2016. – T. 15. – С. 27–37. doi: 10.1016/j.ijcip.2016.07.001.
9. Zhukovytsky, I. Choice of the Optimal Parameters of Measuring the Shaft Rotation Frequency of the Hydraulic Transmission of the Locomotive Using Microcontroller / I. Zhukovytsky, I. Kliushnyk // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 2 (68). – С. 36–45. doi: 10.15802/stp2017/99945.
10. Zhukovytsky, I. V. Use of Microcontroller for Measuring Shaft Speed of Diesel Locomotive Hydraulic Transmission / I. V. Zhukovytsky, I. A. Kliushnyk // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 5 (65). – С. 43–53. doi: 10.15802/stp2016/83990.

И. А. КЛЮШНИК^{1*}

^{1*}Каф. «Електронні вичислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Цель. Статья ставит целью определение рациональных параметров интерфейсов передачи данных информационно-измерительной системы испытаний гидравлических передач тепловозов, а также нахождение степени отказоустойчивости в различных режимах работы системы. **Методика.** В работе исследователем были определены и теоретически рассчитаны основные характеристики каналов передачи данных от аппаратных преобразователей сигналов аналоговых датчиков технологических параметров к компьютеру. Для более полной оценки была создана имитационная модель в среде MATLAB для исследования поставленной задачи. Анализ результатов теоретических расчетов, полученных с помощью имитационной модели с целью определения рациональных настроек интерфейсов (скорости передачи, элементной базы, структуры системы и т. д.) передачи данных, позволяет определить необходимые характеристики системы. **Результаты.** Для существующей информационно-измерительной системы испытаний гидравлических передач тепловозов были проведены исследования с целью определения и расчета основных характеристик каналов передачи данных от аппаратных преобразователей сигналов аналоговых датчиков технологических параметров к компьютеру. Для исследования тахометрической подсистемы была создана имитационная модель, которая позволила исследовать основные характеристики каналов передачи данных от аппаратных преобразователей сигналов аналоговых датчиков тахометрических параметров к компьютеру. Был проведен анализ данных, полученных по результатам теоретических расчетов и с помощью имитационной модели, и определены пути рациональной настройки их передачи. **Научная новизна.** Исследование и теоретические расчеты основных характеристик каналов передачи данных от аппаратных преобразователей сигналов аналоговых датчиков к компьютеру показали, что система работает в режиме фактического «отказа от обслуживания». Для более детальных исследований процессов, протекающих в системе передачи тахометрических данных, в среде MATLAB была создана имитационная модель, которая позволила провести ряд экспериментов. **Практическая значимость.** На основе экспериментов с моделью были установлены рациональные пути решения существующей проблемы: работы системы в режиме фактического «отказа от обслуживания». Также внедрение одного из предложенных способов решения проблемы или их комбинирование требуют дальнейших исследований в реальной системе.

Ключевые слова: имитационная модель; MATLAB; SIMULINK; гидравлическая передача; испытания гидропередач; испытательный стенд; информационно-измерительная система

I. A. KLIUSHNYK^{1*}

^{1*}Dep. «Electronic Computers», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail klugran@i.ua, ORCID 0000-0001-9939-0755

RESEARCH OF RATIONAL CHARACTERISTICS OF THE DATA COMMUNICATION LINKS OF THE INFORMATION AND MEASURING SYSTEM

Purpose. The article focuses on determining the rational parameters of data transmission interfaces for information and measuring system for testing the hydraulic transmissions, as well as determining the degree of fault tolerance in various operating modes of the system. **Methodology.** In the study the researcher has determined and theoretically calculated the main characteristics of the data transmission channels from the hardware converters of the data signals of analog sensors of technological parameters to the computer. For a more complete assessment, an

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

imitation model was created in the MATLAB environment to study the assigned task. Analysis of the results obtained from the theoretical calculations and using the simulation data model to determine the rational settings of interfaces (rational transmission speed, rational element base, rational system structure, etc.) of data transmission makes it possible to determine the rational characteristics of the system. **Findings.** For the existing information-measuring system for testing hydraulic locomotive transmission of diesel locomotives, studies were carried out to determine and theoretically calculate the main characteristics of the data transmission channels from the hardware converters of data signals from analog sensors of technological parameters to the computer. To study the tachometric subsystem, an imitation model was created that allowed to investigate the main characteristics of the data transmission channels from the hardware converters of data signals of analog sensors of tachometric parameters to the computer. The results of theoretical calculations were analyzed and the rational settings of the data transmission system were determined using the simulation model of data. **Originality.** The study to determine and theoretically calculate the main characteristics of the data transmission channels from the hardware converters of data signals of analog sensors of technological parameters to the computer showed that the system operates in the mode of actual «non-maintenance». For more detailed studies of the processes occurring in the transmission system of tachometric data, an imitation model was created in the Matlab environment. This model allowed carrying out a number of experiments. **Practical value.** On the basis of experiments with the model, rational ways of solving the existing problem of the system operation in the mode of actual «non-maintenance» were established. Also, the introduction of one of the proposed methods for solving the problem or combining them requires further research in the real system

Keywords: simulation model; MATLAB; SIMULINK; hydraulic transmission; hydrotransmission tests; test stand; information-measuring system

REFERENCES

1. Belashov, V. Y., & Asadullin, A. I. (2012). Mobilnyy eksperimentalnyy kompleks dlya issledovaniya elektromagnitnykh poley, generiruemyykh elektrooborudovaniem i elementami elektroenergeticheskikh sistem. *Promyshlennaya energetika*, 8, 52-55. (in Russian)
2. Bratukha, M. A., & Shevchenko, O. G. (2012). Issledovanie tochnosti otscheta vremennykh intervalov v sisteme windows. *Informatyka ta kompiuterni tekhnologii-2012: materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv*, 59-63. (in Russian)
3. Bodnar, B. Y., Ochkasov, O. B., Koreniuk, R. O., & Kliushnyk, I. A. (2017). Vykorystannia metodu vilnoho vybihu pry vyznachenni mekhanichnykh vtrat v hidravlichnykh peredachakh pry stendovykh vyprovuvanniakh. *Abstracts of the 77 International Scientific & Practical Conference "The Problems and Prospects of Railway Transport Development"*, 16-17. (in Ukrainian)
4. Esaulenko, V. A., & Nikoryuk, N. S. (2006). Metodika i algoritm rascheta perekhodnykh protsessov v dvigatele postoyannogo toka posledovatel'nogo vzbuzhdeniya. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 3(2), 137-139. (in Russian)
5. Zhukovytsky, I. V., Kliushnyk, I. A., Ochkasov, O. B., & Korenyuk, R. O. (2015). Information-measuring Test System of Diesel Locomotive Hydraulic Transmissions. *Science and Transport Progress*, 5(59), 53-65. doi: 10.15802/stp2015/53159. (in Russian)
6. Kołek, K. (2013). Windows7 x64 as real-time measurement and control platform. *Przegląd Elektrotechniczny*, 89(2a), 68-71. (in English)
7. Sellappan, P. (2017). Response Time Considerations in Realtime Software Design. *Malaysian Journal of Computer Science*, 9(1), 25-31. (in English)
8. Urrea, C., Morales C., & Kern, J. (2016). Implementation of error detection and correction in the Modbus-RTU serial protocol. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 15, 27-37. doi: 10.1016/j.ijcip.2016.07.001. (in English)
9. Zhukovytsky, I., & Kliushnyk, I. (2017). Choice of the Optimal Parameters of Measuring the Shaft Rotation Frequency of the Hydraulic Transmission of the Locomotive Using Microcontroller. *Science and Transport Progress*, 2(68), 36-45. doi: 10.15802/stp2017/99945. (in English)
10. Zhukovytsky, I. V., & Kliushnyk, I. A. (2016). Use of Microcontroller for Measuring Shaft Speed of Diesel Locomotive Hydraulic Transmission. *Science and Transport Progress*, 5(65), 43-53. doi: 10.15802/stp2016/83990. (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. В. Жуковицьким (Україна)

Надійшла до редколегії: 09.10.2017

Прийнята до друку: 08.01.2018

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.01

Д. О. БАННИКОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 57, ел. пошта bdo2010@rambler.ru, ORCID 0000-0002-9019-9679

ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПК SCAD ДЛЯ АНАЛІЗУ РОБОТИ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. У випадку аналізу роботи машинобудівних конструкцій безпосереднє використання будівельно-орієнтованих програмних розробок є неможливим, оскільки ідеологія та методика рішення різноманітних задач у будівництві та машинобудуванні різняться. Тому при проведенні практичних розрахунків виникає необхідність у певному коригуванні закладених у програмні комплекси підходів та їх адаптації до машинобудівної галузі. Викладення авторського досвіду використання будівельно-орієнтованого програмного комплексу SCAD for Windows для аналізу роботи різноманітних машинобудівних конструкцій, їх вузлів та агрегатів і є безпосередньою метою публікації. **Методика.** На протязі значного терміну часу автор займався аналізом роботи будівельних, переважно тонкостінних, сталевих конструкцій за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) на базі програмного комплексу SCAD for Windows. Паралельно з цим було розглянуто значну кількість машинобудівних конструкцій, в тому числі одиниць рухомого складу залізниці. Більшість із таких задач переростали в науково-пошукову проблему, яку необхідно було всебічно дослідити та проаналізувати перед тим, як надавати конструкторські рекомендації. **Результати.** В публікації представлені більше десятка різноманітних задач, характерних для галузі машинобудування, з якими автору довелося мати справу. Серед них статична та квазістатична задачі, задача руху в часі, контактна задача, задача розвитку тріщин, фізична та геометрична нелінійності. Відповідно до кожної з цих задач наведені основні проблеми, особливості та практичні прийоми, напрацьовані під час дослідження, а також в якості ілюстрації представлені побудовані скінченно-елементні моделі. **Наукова новизна.** Узагальнено досвід використання будівельно-орієнтованого програмного продукту на базі методу скінчених елементів для аналізу роботи машинобудівних конструкцій. Викладено низку практичних прийомів та підходів до вирішення різноманітних задач у машинобудівній галузі. **Практична значимість.** Застосування наведеної інформації, методів та підходів дозволяє не тільки вирішити конкретні практичні задачі машинобудівної галузі, а й отримати коректні та практично прийнятні рішення.

Ключові слова: метод скінчених елементів; ПК SCAD for Windows; машинобудування; конструкція

Введення

У теперішній час одним із основних методів аналізу роботи різноманітних конструкцій є метод скінчених елементів (МСЕ). У класичному вигляді він був викладений в роботах О. Зенкевича (див. наприклад [7]).

Сучасне трактування цього методу налічує його чотири види, які відрізняються за способом отримання основних рівнянь – прямий ме-

тод, варіаційний метод, метод нев'язок і метод енергетичного балансу, а також три форми залежно від вибору вузлових невідомих – метод переміщень, метод сил і змішаний метод [13, 16]. Також останнім часом виникають різноманітні варіації гібридної форми МСЕ [14, 15, 18].

Широке використання МСЕ для інженерних розрахунків обумовлено, в основному, можливістю створення на його основі програмних продуктів, які надають змогу змодельовати ду-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

же широке коло задач, починаючи з механіки твердого тіла, механіки рідин та газів, і закінчуючи електромагнетизмом і ядерною фізикою. Найбільш потужними та відомими подібними сучасними комплексами є ANSYS (www.ansys.com) [8, 19] та SolidWorks (solid-works.com) [1, 17]. Проте їх висока вартість та значна громіздкість у використанні нерідко стають дуже суттєвими перепонами для інженера. До того ж ці комплекси мають виражену машинобудівну специфіку.

У свою чергу, різноманітні задачі механіки, починаючи зі статичних, температурних та закінчуючи динамічними й ударно-інерційними задачами, нерідко потребують розробки спеціалізованих пакетів програм, що орієнтовані суто на певний різновид або конструкцій, або середовища. Найбільш популярною подібною розробкою є NASTRAN [6]. Проте його офіційна версія також має досить значну вартість за мірками інженерії.

Провідні вітчизняні програмні продукти на основі МСЕ в галузі механіки хоча і мають на порядок нижчу вартість, проте є будівельно-орієнтованими комплексами – SCAD (scadsoft.com) [12], Lira (lira.com.ua) [4], Селена (selenasys.com).

Мета

У випадку аналізу роботи машинобудівних конструкцій безпосереднє використання подібних будівельно-орієнтованих програмних розробок є неможливим, оскільки ідеологія та методика рішення різноманітних задач в будівництві та машинобудуванні розрізняються, виникає необхідність у певному коригуванні закладених у програмні комплекси підходів та їх адаптації до машинобудівної галузі.

Викладення авторського досвіду використання ПК SCAD for Windows для аналізу роботи різноманітних машинобудівних конструкцій, їх вузлів і агрегатів є безпосередньою метою даної публікації.

Методика

На протязі значного терміну часу автор займався аналізом роботи будівельних, переважно тонкостінних, сталевих конструкцій за допомогою МСЕ на базі ПК SCAD for Windows

[9]. Паралельно з цим було розглянуто значну кількість машинобудівних конструкцій, у тому числі одиниць рухомого складу залізниці, співпрацюючи з ГНДЛ динаміки і міцності рухомого складу університету. Такі конструкції також утворені зі сталевих несучих елементів, що мають тонкостінні профілі. Тому їх робота дуже схожа з роботою тонкостінних ємнісних конструкцій, але з певною специфікою.

Відразу хотілося б відзначити, що багато практичних задач, із якими довелося зіштовхнутися, не мали ані теоретичного опису в спеціалізованій літературі, ані практичних вказівок щодо їх розв'язку. Тому більшість із таких задач переросли в науково-пошукову проблему, яку необхідно було всебічно дослідити та проаналізувати перед тим, як надавати конструкторські рекомендації.

Нижче представлені найбільш цікаві практичні задачі, з якими довелося мати справу автору. Відповідно до кожної з них наведені основні проблеми, особливості та практичні прийоми, напрацьовані під час роботи.

Результати

1. Статична задача. Дана задача є найбільш поширеною для будівельних конструкцій, проте в машинобудівній галузі вона зустрічається досить рідко, адже всі машини або рухаються самі, або мають рухомі частини. Все це створює різноманітні динамічні навантаження. Їх точне та коректне врахування являє собою доволі складну проблему, адже більшість із таких навантажень має важкопрогнозований випадковий характер. Тому в практиці досить поширеним є зведення динамічної задачі до квазістатичної з допомогою різноманітних динамічних коефіцієнтів.

Особливо популярним є такий підхід по відношенню до залізничних рухомих одиниць – електровозів, тягових агрегатів, вагонів тощо. Він офіційно закріплений у нормативних документах [10, 11], якими користуються в Україні певні замовники робіт.

1.1. Найбільш цікавим та трудомістким прикладом такої задачі була задача аналізу однокосекційного електровозу ДСЗ. Скінченно-елемента модель електровоза представлена на рис. 1, а. Вона являє собою пластинчасто-стержневу систему з близько 40 000 вузлами.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Результати розрахунків від прикладених навантажень для різних режимів порівнювалися з результатами експериментальних досліджень. По всіх контрольних точках погрішність не перевищувала 30–35 %, що свідчить про досить високу вірогідність як самої побудованої моделі, так і в цілому ПК SCAD, хоча й використовувалися досить старі версії цього комплексу.

Це дало можливість визначити певні резерви конструкції машини та запропонувати варіанти зменшення її конструктивної маси на 1,5 тони, чого і вимагав замовник.

Основною складністю під час створення моделі виявилася неможливість використання вбудованої у ПК SCAD опції щодо визначення розрахункових сполучень зусиль (PC3), адже розробники заклали прийняту в будівництві класифікацію навантажень та відповідну систему коефіцієнтів. Тому для пластинчастих елементів результати порівнювалися за напруженням, а для стержневих елементів – необхідною було вручну складати та аналізувати PC3.

Також другою суттєвою трудностю виявився аналіз результатів у концентраторах напружень. Ця проблема взагалі, як було з'ясовано пізніше, є одним зі «слабких місць» МСЕ та її розгляду автор приділяв окрему увагу [2, 3].

Побудована модель електровозу ДСЗ також дозволила проаналізувати іншу практичну ситуацію. При ремонтних роботах у депо корпус машини підіймають на домкратах. При цьому завдяки нерівномірності підйому виникають певні перекоси, що веде, наприклад, до заклинювання дверей машиніста. Для отримання результатів аналізу ситуації було розглянуто близько 20 різних варіантів розташування підйомних домкратів та обрано найбільш раціональний, який передбачав мінімальні деформації кузова машини.

1.2. Оскільки ПК SCAD не передбачає можливості субмоделювання, то для детального аналізу окремих конструктивних елементів та вузлів машини ДСЗ необхідно було створювати окремі скінченно-елементні моделі. Однією з перших була модель буферного бруса, розрізаного навпіл для економії машинних ресурсів (рис. 1, б). Вона являла собою пластинчасту систему з близько 3 500 вузлами.

Основною складністю при такому «вирізанні» окремих частин машини є необхідність ко-

ректної передачі внутрішніх зусиль на такий фрагмент, а також вибір граничних умов, які б максимально відтворювали характер роботи елемента в конструкції.

Якщо по відношенню до першого моменту можна надати чітку апробовану рекомендацію – включати до моделі фрагмента ще два додаткові перерізи елемента, то по відношенню до характеру закріплень – їх відтворення в кожному конкретному випадку досить індивідуальне, хоча перевагу краще надавати закріпленню в площині «вирізу» тільки трьох лінійних переміщень.

1.3. Іншим розглянутим конструктивним елементом електровоза ДСЗ був ізолятор кріплення струмоведучих елементів на даху машини. Поставлена задача передбачала аналіз зони прикріплення самого ізолятора до конструкції. Для її рішення було побудовано спеціальну скінченно-елементну модель, що включала моделювання зварних швів, утримуючих елементи опори.

При цьому найбільш проблемним та суперечливим питанням була необхідність аналізу витримування таких елементів кріплень на екстремальне навантаження величиною 3g, рекомендоване нормами [10]. Однак, чітко визначення того, що в несучих елементах вважати кріпленням, в нормах відсутнє.

Самі зварні шви були змодельовані спеціальними ізопараметричними 20-вузловими просторовими скінченими елементами, включеними до бібліотеки елементів ПК SCAD (рис. 1, в). Такий елемент з усіх наявних показав найкращий рівень збіжності результатів, порівняно з аналітичними розрахунками. Тому саме він може бути рекомендований для моделювання зварних швів у конструкціях.

1.4. Іншою машиною, з якою авторам довелось мати справу, був електровоз ДЕ1. Побудована пластинчаста модель несучої рами візка наведена на рис. 2, а. Вона складалась із близько 15 000 скінчених елементів та 15 000 вузлів. На рис. 2, б представлена модель боковини візка, що складається з близько 5 000 скінчених елементів і 5 000 вузлів. Також окремо розглядалась рама під електрообладнання, розташована в корпусі електровоза ДЕ1. Її модель являла собою пластинчасту систему з близько 40 000 вузлами – рис. 2, в.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

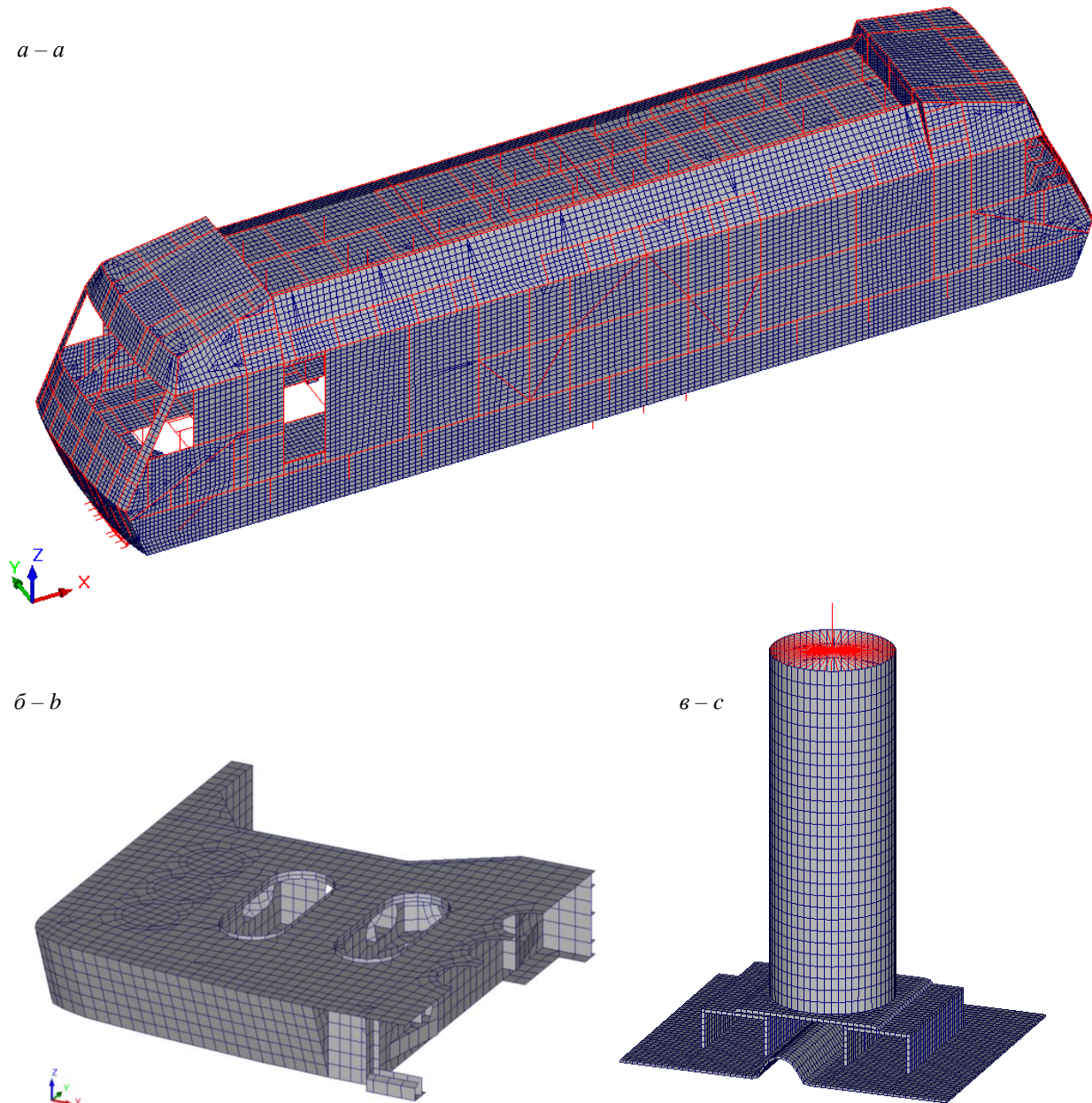


Рис. 1. Скінченно-елементні моделі електровоза ДС3 та його конструктивних елементів:
a – електровоз ДС3; *б* – буферний брус; *в* – ізолятор кріплення струмоведучих елементів

Fig. 1. Finite element models of the electric locomotive DS3 and its structural elements:
a – electric locomotive DS3; *b* – buffer beam; *c* – insulation for fastening of current-carrying elements

У цьому конструктивному елементі стержневі балки та стійки були змодельовані як пластини. За результатами порівняльного аналізу з аналогічною стержневою моделлю в самих стержнях різниці в показниках напружено-деформованого стану не перевищували 10 %. Проте перехід на використання пластинчастих скінчених елементів дозволив, по-перше, змо-

делювати погнутості та отвори в елементах рами, а по-друге, виявити низку небезпечних концентраторів у вузлах стикування окремих стержнів. Звісно, що стержнева модель не дозволяє відобразити цих особливостей, тому подібні конструкції необхідно моделювати пластинчастими елементами.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

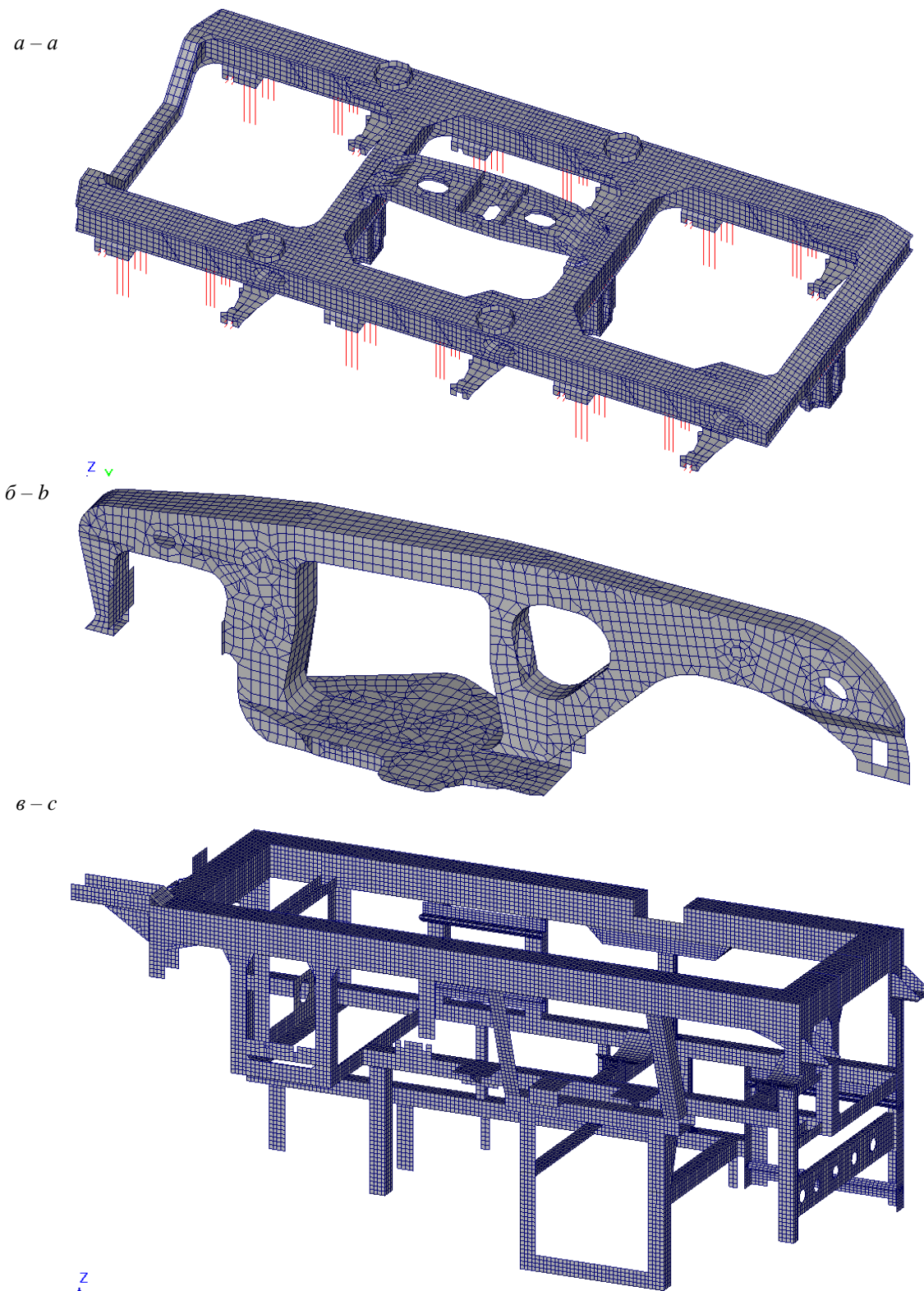


Рис. 2. Скінченно-елементні моделі електровоза ДЕ1 та його конструктивних елементів:
a – рама візка; *б* – боковина візка; *в* – рама під електрообладнання

Fig. 2. Finite element models of the electric locomotive DE1 and its structural elements:
a – bogie frame; *b* – bogie side frame; *c* – frame for electrical equipment

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

1.5. Для підвищення точності та достовірності розрахункових моделей досить часто використовують просторові (об'ємні, 3D) скінченні елементи. Це само по собі збільшує точність моделі та надає можливість якнайкраще передати геометрію реальних об'єктів.

Прикладом такої моделі може служити модель букси електровоза ДСЗ – рис. 3, а. Вона має в своєму складі близько 140 000 просторових елементів 8-вузлового ізопараметричного типу. В результаті розмірність задачі складала близько 400 000 ступенів вільності. Використання в цьому випадку 20-вузлового просторового скінченного елемента, безумовно, підвищує точність обчислень, проте в 3–4 рази збільшує розміри задачі, що для складних конструкцій є досить проблематичним.

Основною складністю при застосуванні ПК SCAD є практично повна відсутність інструментальної бази для роботи з просторовими скінченими елементами. Найгіршим є те, що всю скінченно-елементну сітку необхідно моделювати вручну (!) за відсутності засобів її автоматизованої генерації. Цей надзвичайно суттєвий недолік практично унеможливує використання ПК SCAD для просторових задач значного обсягу. Наприклад, на побудову та налагодження моделі букси було витрачено майже місяць кропіткої праці.

Зауважимо, що у випадку задач невеликого обсягу – розробки кронштейну 6-осного думпкара (рис. 3, б) – застосування ПК SCAD є цілком прийнятним.

1.6. Таке становище речей примусило шукати інші шляхи моделювання, зокрема, поєднання просторових скінчених елементів із плоскими. Прикладом може служити модель (половина) буферного бруса електровоза ДЕ1, яка включає близько 70 000 елементів і 65 000 вузлів – рис. 4.

Передня стінка та система внутрішніх ребер жорсткості моделювались пластинчастими скінченими елементами, усі інші частини бруса – просторовими елементами. Таке рішення було обумовлено ще й необхідністю задавати навантаження на поверхню. Ця опція в ПК SCAD передбачена тільки для плоских скінчених елементів.

Основною складністю такого «подвійного» моделювання є спотворення результатів у міс-

цях контакту скінчених елементів різних типів. Адже у вузлах плоского елемента відшукуються 6 невідомих переміщень, а у вузлах просторового – лише 3. Частина зусиль начебто «зникає» при передачі від елемента одного типу до іншого. Тому таку комбінацію скінчених елементів різних розмірностей слід використовувати дуже обережно, щоб не отримати хибний результат.

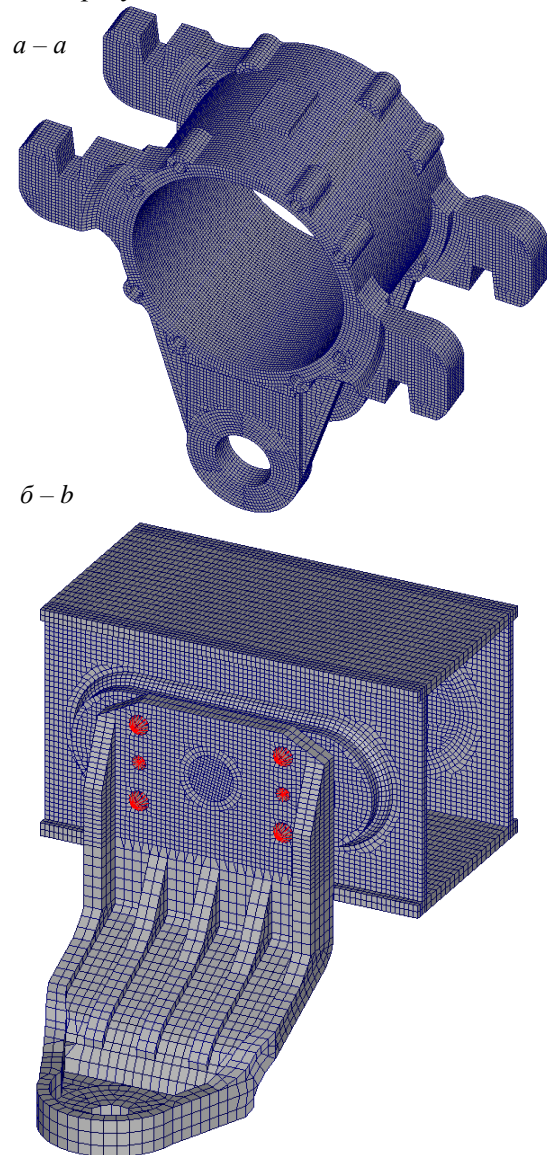


Рис. 3. Скінченно-елементні моделі з просторових скінчених елементів:
а – брус електровоза ДСЗ;
б – кронштейн 6-осного думпкара

Fig. 3. Finite element models of spatial finite elements:
а – electric locomotive DS3 box;
b – bracket of the 6-axis dumper car

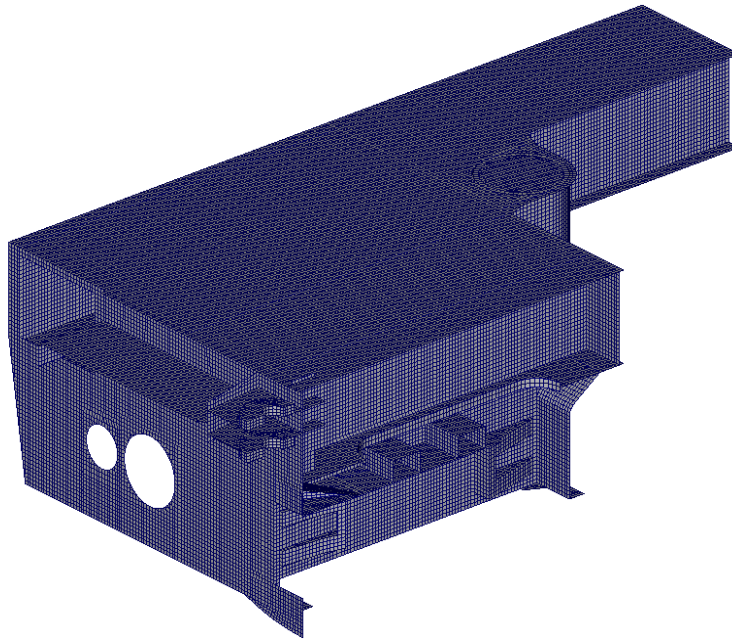


Рис. 4. Скінченно-елементна модель буферного бруса електровоза ДЕ1

Fig. 4. Finite element model of buffer beam in electric locomotive DE1

2. Задача руху в часі. Ще одним проблемним конструктивним елементом електровоза ДСЗ був струмоприймач. За характером роботи це є рухомий елемент, який може складатися/розкладатися під час експлуатації машини, а також дещо змінювати своє просторове положення в залежності від натягу дротів.

Для аналізу такої ситуації у ПК SCAD відсутні будь-які засоби, які дозволяли б моделювати задачі руху в часі, оскільки в будівельних конструкціях робота елементів передбачається як статична, без зміни їх геометричного положення. Тому була розроблена спеціальна методика, яка передбачала побудову ряду скінченно-елементних моделей із різною геометрією. Так, струмоприймач моделювався для повністю складеного положення (кут 10°), повністю розкритого положення (кут 50°) і низки проміжних положень (кути 12° , 15° , 25° , 35° і 45°) – рис. 5, а–г.

Модель являла собою стержневу систему з 75-и скінчених елементів. Найбільші зусилля за результатами обчислень спостерігались при куті підйому $14,5^\circ$, для чого будувалась апроксимаційна крива.

Використання стержневих елементів у даній задачі обумовлено формою поперечного перерізу самих елементів – кругла труба. У випадку

моделювання такого перерізу пластинчастими елементами необхідна досить дрібна розбивка на скінченні елементи по довжині кола. Як свідчать дані тестових моделей, спеціально побудованих та проаналізованих для цього випадку, достатнім слід вважати таку кількість елементів, за якої утворюється кут не більше 5° між окремими скінченими елементами. При цьому не створюється викривлення поля напружень, описане, наприклад, у [19].

На практиці, виходячи з необхідності мати форму скінченного елемента, що наближена до квадратної, це приводить до значної кількості скінчених елементів по довжині конструктивного елемента. За підрахунками автора в ситуації, що розглядається, модель струмоприймача мала б містити близько 500 000 вузлів, що становить порядку 3 млн. ступенів вільності. Навіть для сучасних комп'ютерів можливість формування та аналізу подібної моделі має бути спеціально обґрунтована.

У зв'язку з останнім необхідно також відзначити, що питання створення дрібної скінченно-елементної сітки та, відповідно, моделей значної розмірності, залишається все ще достатньо актуальним, адже як відмічено, наприклад, в роботі [5], все ж таки зберігається небезпека втрати точності рішення під час математичних операцій із наближеними числами.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

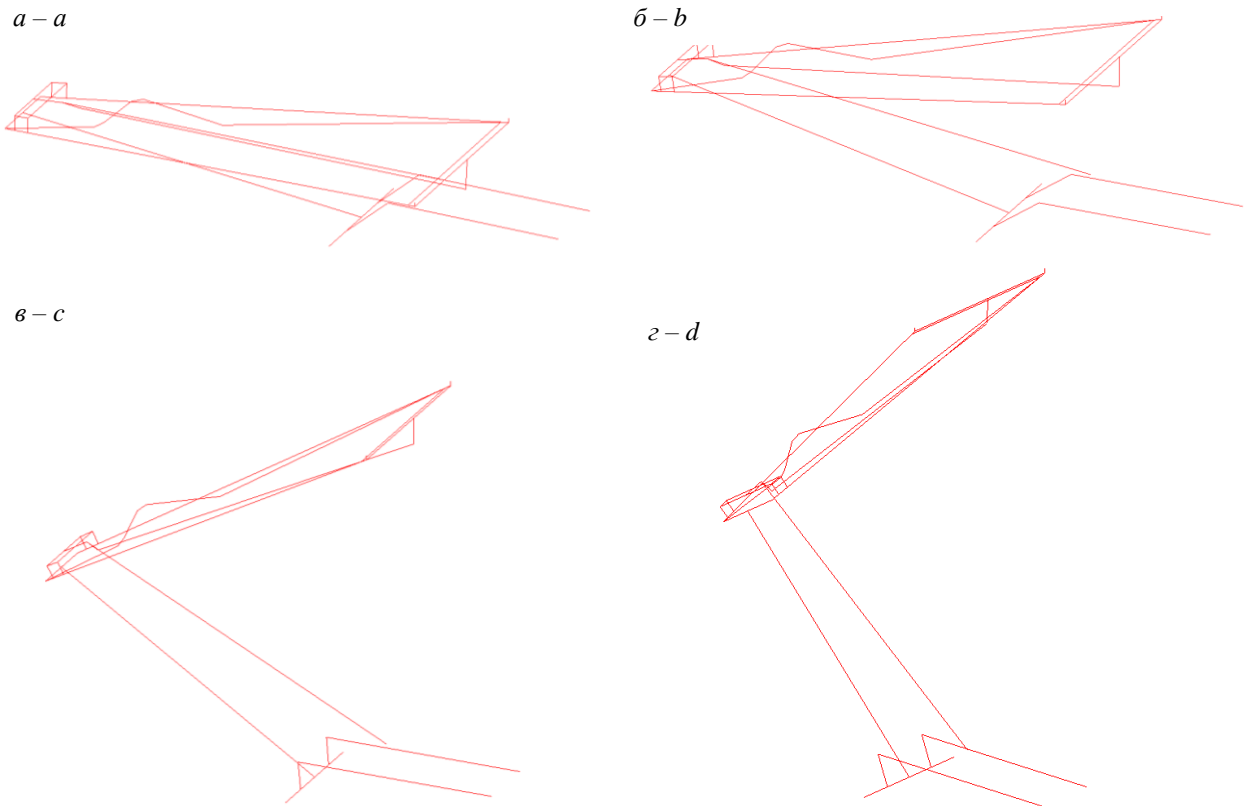


Рис. 5. Скінченно-елементні моделі струмоприймача електровоза ДС3 в положеннях:
 $a - 10^\circ$; $b - 15^\circ$; $v - 35^\circ$; $z - 50^\circ$

Fig. 5. Finite-element models of the current collector in the electric locomotive DS3 in the positions:
 $a - 10^\circ$; $b - 15^\circ$; $c - 35^\circ$; $d - 50^\circ$

3. Контактна задача. Така задача є найпоширенішою для машинобудівних конструкцій. Проте для цього випадку ПК SCAD передбачає лише досить простий інструментарій для розгляду найпростішого випадку контакту двох площин. Однак, як показали результати тестового моделювання, навіть у цьому випадку геометрично-нелінійна задача примушує виконувати значну кількість ітерацій, що само по собі підвищує час пошуку рішення. До того ж дуже часто на одному з кроків рішення задачу просто «вибиває» через внутрішню помилку, обумовлену, як правило, високою нев'язкою між ітераційними кроками.

Одним із можливих виходів є використання стержневих елементів у зоні контакту. Так було змодельовано взаємодію ступиці колеса електровоза ДС3 з несучим валом – рис. 6.

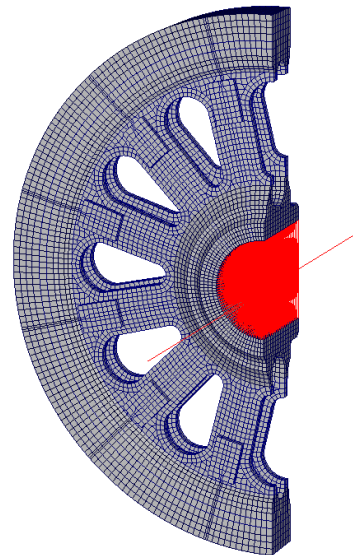


Рис. 6. Скінченно-елементна модель колеса електровоза ДС3

Fig. 6. Finite element model of the wheel in the electric locomotive DS3

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Застосування стержнів передбачає виконання потрібних ітерацій «вручну». Сутність такої методики полягає в тому, що на першому кроці вирішується звичайна лінійна задача з усіма змодельованими стержнями. По результатах першого кроку ті стержні, в яких наявні зусилля розтягу, видаляються з моделі. Знов вирішується звичайна лінійна задача, і знов розтягнуті стержні видаляються з моделі. Так продовжується до тих пір, доки після чергового розрахункового кроку не залишаться тільки розтягнуті стержні. Звісно, що тип скінченного стержневого елемента має бути таким, що забезпечує роботу тільки на стиск-розтяг.

Аналогічним шляхом вирішувалися різноманітні «контактні» задачі за допомогою ПК SCAD, проте достовірність отримуваних результатів у жодному випадку точно встановити не вдалося – через відсутність даних для порівняння.

4. Задача розвитку тріщини. Такі задачі, в яких потрібно відслідкувати процес руйнування матеріалу конструкції, вважаються одними з найскладніших. Проте вирішити їх за-

собами ПК SCAD безпосередньо неможливо, через відсутність необхідного інструментарію. Тому в цьому випадку може бути застосована методика «ручних» ітерацій, аналогічна до випадку контактної задачі.

Її сутність полягає в тому, що в місцях екстремальних напруг, які перевищують межі міцності матеріалу, після звичайного лінійного розрахунку вирізається певна ділянка конструкції, яка моделює утворення тріщини. Далі виконується повторний розрахунок, після чого оцінюється рівень напруг у зоні, що розглядається, – якщо він перевищує межу міцності матеріалу, то розмір «тріщини» збільшується. Таким чином виконується ряд розрахунків, доки напруження не перевищуватимуть встановлену межу. При цьому розвиток «тріщини» може як призупинитися, так і продовжитися.

Така методика була апробована на моделі пресу для штампування залізничних коліс – рис. 7. Тріщина досягла величини близько 1 м і зупинилася.

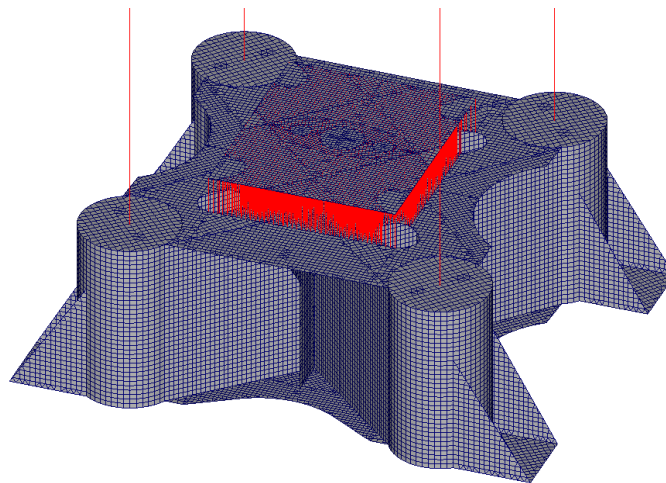


Рис. 7. Скінченно-елементна модель пресу для штампування залізничних коліс

Fig. 7. Finite-element model of press for railway wheels stamping

5. Фізична нелінійність. Окремим різновидом задач, що притаманні сфері машинобудування, є задачі транспортування різноманітних вантажів. Для цього можуть бути спеціально сконструйовані та виконані додаткові конструкції з демпфуючими елементами, які утримували б вантаж у проектному положенні.

Так, однією з подібних задач буда задача транспортування залізницею 6-осного думпкара. При цьому візки транспортувались окремо,

а сам корпус насаджувався на спеціально сконструйовані балки з опорними конусами у верхній частині (рис. 8). На поверхню цього конусу укладався шар спеціального полімеру, який виконував функцію демфера.

Моделювання такого прошарку передбачає можливість завдання нелінійної діаграми роботи матеріалу та рішення відповідної фізично-нелінійної задачі. Проте в ПК SCAD така можливість повністю відсутня, і для полімерного

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

прошарку в моделі прийшлося задавати усереднені лінійні фізичні характеристики. Наскільки це викривило результат – встановити не вдалося.

6. Посадка з натягом. Ще однією розповсюдженою задачею галузі машинобудування є з'єднання елементів із натягом. Наприклад, таким чином встановлюються в отвори шплінти, передбачені в спеціальному пристрої для виготовлення заклепок холодним способом (рис. 9).

Даний клас задач фактично поєднує в собі два окремі різновиди задач – контактну і задачу попереднього напруження (до речі, відому в будівництві). Кожна з цих задач сама по собі є геометрично-нелінійною, а їх поєднання є геометрично-нелінійністю «в квадраті». Звісно ж, їх рішення являє собою доволі складну й неоднозначну проблему, навіть для спеціалізованих програмних продуктів типу ANSYS або SolidWorks.

В ПК SCAD, на жаль, подібні машинобудівні задачі вирішити та, навіть, змоделювати

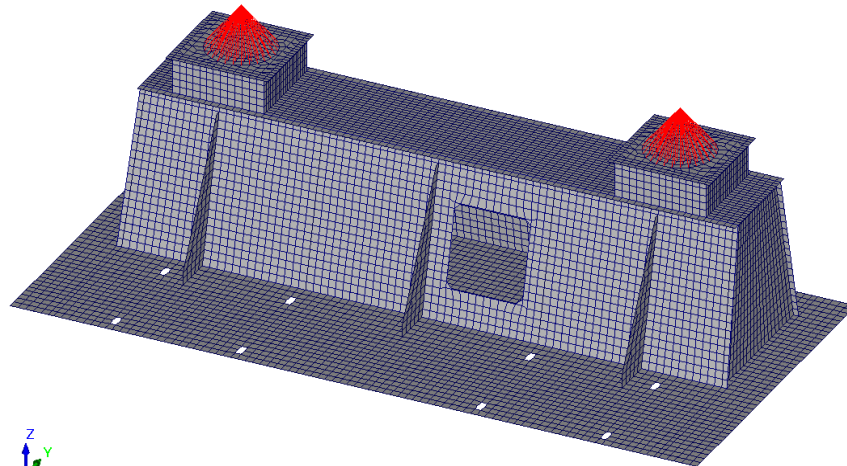
в теперішній час виявляється практично неможливим. Тому в практиці доводиться розглядати конструктивний елемент із отворами замість моделювання, наприклад, шплінтів, вважаючи таке рішення «йдучим в запас».

Наукова новизна та практична значимість

Оскільки в наявній фаховій літературі по проектуванню засобів транспорту практично повністю відсутня інформація стосовно використання будівельно-орієнтованих програмних продуктів на базі МСЕ, то узагальнений автором досвід дещо зменшує цей пробіл.

Також, на думку автора, фахівці, що працюють у сфері використання скінченно-елементного моделювання, безумовно, мають знайти для себе в даній публікації нові практичні прийоми чи підходи до вирішення різноманітних задач у машинобудівній галузі.

$a - a$



$b - b$

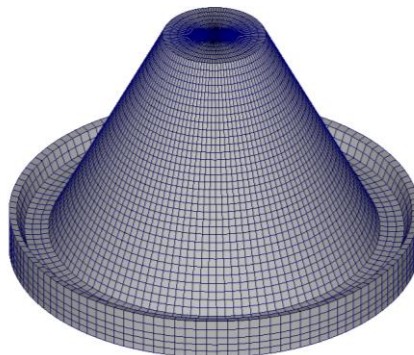


Рис. 8. Скінченно-елементна модель a – опорної балки та b – опорного конуса для транспортування 6-осного думпкара

Fig. 8. Finite element model a – the supporting beam and b – the supporting cone for transportation of 6-axle dumper

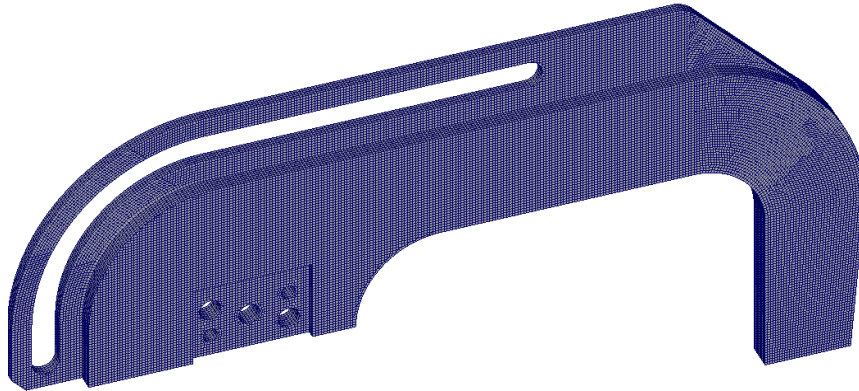


Рис. 9. Скінченно-елементна модель пристрою для виготовлення заклепок холодним способом

Fig. 9. Finite-element model of the device for cold rivets making

Висновки

Підсумовуючи все вищевикладене в даній публікації, слід узагальнити накопичений досвід використання будівельно-орієнтованого ПК SCAD для машинобудівної галузі:

1. У цілому ПК SCAD дозволяє вирішувати досить значне коло машинобудівних задач, схожих на задачі оцінки несучої здатності в будівництві. При цьому слід окремо зважати на проблему збіжності результатів у концентраторах.

2. Основними особливостями використання ПК SCAD при цьому є:

- розрахункові сполучення навантажень мають визначатись вручну, а комбінації навантажень – задаватись при спеціальному завантаженні;

- можливість «субмоделювання» має реалізовуватись побудовою окремої моделі для досліджуваної частини конструкції. При цьому необхідно залишати «на запас» приблизно подвійний розмір перерізу;

- для моделювання задач невеликої розмірності, у тому числі й для зварних швів, найбільш високу точність забезпечує просторовий

ізопараметричний 20-вузловий скінчений елемент;

- для моделювання задач конструкцій значної розмірності необхідно використовувати звичайний 8-вузловий просторовий ізопараметричний скінчений елемент. Причому поєднання в одній моделі такого елемента разом із пластинчастим призводить до втрати точності рішення.

3. Моделювання задачі руху конструктивного елемента в часі може бути реалізовано за допомогою побудови серії моделей із різним просторовим положенням рухомих елементів та подальшим відшукуванням найгіршого положення.

4. Для моделювання контактної задачі слід використовувати описану в публікації методику «ручних» ітерацій. Аналогічна за змістом методика може бути використана й для прогнозування розвитку тріщин.

5. Від моделювання фізично-нелінійних задач та задач попереднього натягу в ПК SCAD краще відмовитись та використовувати для цього більш потужні закордонні програмні продукти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
2. Банников, Д. О. Корректировка результатов расчета напряжений по МКЭ методом HSS / Д. О. Банников, А. Э. Гуслистая // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 134–141.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

3. Банніков, Д. О. Оцінка практичної збіжності результатів аналізу пластинчастих моделей в методі скінчених елементів / Д. О. Банніков // Нові технології в будівництві. – 2017. – № 32. – С. 26–31.
4. Водопьянов, Р. Ю. Программный комплекс Лира-САПР 2014. Руководство пользователя. Обучающие примеры / Р. Ю. Водопьянов, В. П. Титок, А. Е. Артамонова ; под ред. А. С. Городецкого. – Москва : Электрон. изд., 2014. – 394 с.
5. Гуслиста, Г. Е. Оцінка важливості врахування нелінійних властивостей системи “споруда – ґрунтовий масив” при визначенні її напружено-деформованого стану / Г. Е. Гуслиста, Д. О. Банніков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 155–160.
6. Жилкин, В. А. Моделирование и статический расчет элементов конструкций в MSC Patran-Nastran-Marc : учеб. пособие / В. А. Жилкин. – Москва : Проспект науки, 2016. – 240 с.
7. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике : [пер. с англ.] / под ред. Б. Е. Победри. – Москва : Мир, 1975. – 542 с.
8. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера : практ. рук. / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Шамраева. – Москва : Либроком, 2015. – 270 с.
9. Качуренко, В. В. Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов / В. В. Качуренко, Д. О. Банников. – Днепропетровск : Новая идеология, 2016. – 168 с.
10. Нормы для расчета и оценка прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – Москва : МПС РФ : ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.
11. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС РФ колеи 1520 (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
12. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++ / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, С. Ю. Фиалко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – Москва : СКАД СОФТ, 2015. – 848 с.
13. Dow, J. O. A Concise Overview of the Finite Element Method / J. O. Dow. – New York : Momentum Press, 2015. – 220 p.
14. Finite Element Analysis-New trends and Developments / Edited by Farzad Ebrahimi. – London : InTech, 2012. – 410 p. doi: 10.5772/3352.
15. Gatica, G. N. A Simple Introduction to the Mixed Finite Element Method: Theory and Application / G. N. Gatica. – Cham : Springer, 2014. – 132 p. doi: 10.1007/978-3-319-03695-3.
16. Liu, G. R. The Finite Element Method. A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek. – Amsterdam : Elsevier LTD, 2014. – 433 p. doi: 10.1016/b978-0-08-098356-1.00014-x.
17. Onwubolu, G. Front matter / G. Onwubolu // Applied Mechanics with SolidWorks. – London, 2015. – P. i-xvii. doi: 10.1142/9781783263813_fmatter.
18. Overview of Extended Finite Element / Z. Zhuang, Z. Liu, B. Cheng, J. Liao // Extended Finite Element Method. – Amsterdam, 2014. – Chap. 1. – P. 6–12. doi: 10.1016/b978-0-12-407717-1.00001-7.
19. Thompson, M. K. Interacting with ANSYS / M. K. Thompson, J. M. Thompson // ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. – Amsterdam, 2017. – Chap. 1. – P. 11–30. doi: 10.1016/B978-0-12-812981-4.00002-2.

Д. О. БАННИКОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 57, эл. почта bdo2010@rambler.ru, ORCID 0000-0002-9019-9679

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПК SCAD ДЛЯ АНАЛИЗА РАБОТЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель. В случае анализа работы машиностроительных конструкций непосредственное использование строительно-ориентированных программных разработок является невозможным, поскольку идеология и методика решения разнообразных задач в строительстве и машиностроении различаются. Поэтому при

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

проведении практических расчетов возникает необходимость в определенной корректировке заложенных в программные комплексы подходов и их адаптации к машиностроительной отрасли. Изложение авторского опыта использования строительно-ориентированного программного комплекса SCAD for Windows для анализа работы разнообразных машиностроительных конструкций, их узлов, агрегатов и является непосредственной целью публикации. **Методика.** На протяжении значительного периода времени автор занимался анализом работы строительных, преимущественно тонкостенных, стальных конструкций с помощью метода конечных элементов (МКЭ) на базе программного комплекса SCAD for Windows. Параллельно с этим было рассмотрено значительное количество машиностроительных конструкций, в том числе единиц подвижного состава железной дороги. Большинство из таких задач перерастали в научно-поисковую проблему, которую необходимо было всесторонне исследовать и проанализировать перед тем, как приводить конструкторские рекомендации. **Результаты.** В публикации представлены более десятка разнообразных задач, характерных для отрасли машиностроения, с которыми автору пришлось иметь дело. Среди них статическая и квазистатическая задачи, задача движения во времени, контактная задача, задача развития трещин, физическая и геометрическая нелинейности. Соответственно для каждой из этих задач приведены основные проблемы, особенности и практические приемы, наработанные во время исследования, а также в качестве иллюстрации представлены построенные конечно-элементные модели. **Научная новизна.** Обобщен опыт использования строительно-ориентированного программного продукта на базе метода конечных элементов для анализа работы машиностроительных конструкций. Изложен ряд практических приемов и подходов к решению разнообразных задач в машиностроительной сфере. **Практическая значимость.** Применение приведенной информации, методов и подходов позволяет не только решить конкретные практические задачи машиностроительной сферы, но и получить корректные и практически приемлемые решения.

Ключевые слова: метод конечных элементов; ПК SCAD for Windows; машиностроение; конструкция

D. O. BANNIKOV^{1*}

^{1*}Dep. «Construction Production and Geodesy», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 532 54 46, e-mail bdo2010@rambler.ru, ORCID 0000-0002-9019-9679

USAGE OF CONSTRUCTION-ORIENTED SOFTWARE SCAD FOR ANALYSIS OF WORK OF MACHINE-BUILDING STRUCTURES

Purpose. In the case of analysis of work of the machine-building structures, the direct usage of construction-oriented software developments is impossible, since ideology and methodology for solving various tasks in construction and machine-building are different. Therefore, in the conducting of practical calculations, there is a need for a certain adjustment of the approaches put in the program complexes and their adaptation to the engineering industry. The presentation of the author's experience of the construction-oriented software SCAD usage for Windows for analyzing the work of various machine-building structures, their components and assemblies is the immediate purpose of the publication. **Methodology.** During a long period of time the author was engaged in analyzing the work of building, mainly thin-walled, steel structures using the Finite Element Method based on the SCAD for Windows software package. At the same time, a considerable number of machine-building structures were considered, including railroad rolling stock units. Most of these tasks grew into a scientific and research problem that needed to be thoroughly researched and analyzed before giving design recommendations. **Findings.** The publication presents more than a dozen different tasks, typical for the machine-building industry, which the author had to deal with. Static and quasi-static problems, the problem of motion in time, the contact problem, the problem of the cracks development, the physical and geometric non-linearity are among them. Accordingly, for each of these problems the main challenges, features and practical techniques developed during the work are presented, as well as the constructed finite element models are presented as an illustration. **Originality.** The experience of construction-oriented software product usage on the basis of the Finite Element Method for analyzing of the work of machine-building structures is generalized. A number of practical methods and approaches to the solution of various problems in the machine-building sphere are set forth. **Practical value.** The application of the given information, methods and approaches allows not only to solve concrete practical problems of the machine-building sphere, but also to obtain correct and practically acceptable solutions.

Keywords: Finite Element Method; SCAD software package for Windows; machine-building; structure

REFERENCES

1. Alyamovsky, A. A. (2015). *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii*. Moscow: DMK Press. (in Russian)
2. Bannikov, D. O., & Guslistaja, A. E. (2011). Correction of results of stress calculation with FEM by HSS method. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 38, 134-141. (in Russian)
3. Bannikov, D. O. (2017). Otsinka praktychnoi zbizhnosti rezultativ analizu plastynchastykh modelei v metodi skinchenykh elementiv. *Novi tekhnologii v budivnytstvi*, 32, 26-31. (in Ukrainian)
4. Vodopyanov, R. Y., Titok V. P., & Artamonova, A. E. (2014). *Programmnyy kompleks Lira-SAPR 2014. Rukovodstvo polzovatelya. Obuchayushchie primery*. Moscow: Elektronnoe izdanie (in Russian)
5. Guslistaja, A. E., & Bannikov, D. O. (2011). Estimation of the importance of taking into account the nonlinear properties of the system "structure-soil array" in determining its stress-strain state. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 37, 155-160. (in Ukrainian)
6. Zhilkin, V. A. (2016). *Modelirovanie i staticheskiy raschet elementov konstruktiv v MSC Patran-Nastran-Marc: Uchebnoe posobie*. Moscow: Prospekt nauki. (in Russian)
7. Zenkevitch, O., & Pobedrya, B. Y. (Ed). (1975). *Metod konechnykh elementov v tekhnike: Perevod s angliyskogo*. Moscow: Mir. (in Russian)
8. Kaplun, A. B., Morozov, E. M., & Shamraeva M. A. (2015). *ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo*. Moscow: Librocom. (in Russian)
9. Kachurenko, V. V., & Bannikov, D. O. (2016). *Konstruktivnye resheniya stalnykh emkostey dlya sypuchikh materialov*. Dnipropetrovsk: Novaja ideologia. (in Russian)
10. *Normy dlya rascheta i otsenka prochnosti nesushchikh elementov, dinamicheskikh kachestv i vozdeystviya na put ekipazhnoy chasti lokomotivov zheleznykh dorog MPS RF kolei 1520 mm.* (1998). Moscow: MPS RF: VNIIZhT. (in Russian)
11. *Normy rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS RF kolei 1520 (nesamokhodnykh).* (1996). Moscow: GosNIIIV: VNIIZhT. (in Russian)
12. Karpilovsky, V. S., Kriksunov, E. Z., Maljarenko, A. A., Fialko, S. Y., Perelmutter, A. V., & Perelmutter, M. A. (2015). *SCAD Office. Versiya 21. Vychislitelnyy kompleks SCAD++*. Moscow: SKAD SOFT. (in Russian)
13. Dow, J. O. (2015). *A Concise Overview of the Finite Element Method*. New York: Momentum Press. (in English)
14. Ebrahimi, F. (Ed). (2012). *Finite Element Analysis-New trends and Developments*. London: InTech. doi: 10.5772/3352. (in English)
15. Gatica, G. N. (2014). *A Simple Introduction to the Mixed Finite Element Method: Theory and Application*. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-03695-3. (in English)
16. Liu, G. R., & Quek, S. S. (2014). *The Finite Element Method. A Practical Course*. Amsterdam: Elsevier LTD. doi: 10.1016/b978-0-08-098356-1.00014-x. (in English)
17. Onwubolu, G. (2015). Front matter. In G. Onwubolu (Ed.), *Applied Mechanics with SolidWorks*. (pp. i-xvii) London. doi: 10.1142/9781783263813_fmatter. (in English)
18. Zhuang, Z., Liu, Z., Cheng, B., & Liao, J. (2014). Overview of Extended Finite Element. *Extended Finite Element Method*, 1, 6-12. doi: 10.1016/b978-0-12-407717-1.00001-7. (in English)
19. Thompson, M. K., & Thomson, J. M. (2017). Interacting with ANSYS. *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*, 1(11-30). doi: 10.1016/B978-0-12-812981-4.00002-2. (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С. В. Ракшою (Україна)

Надійшла до редколегії: 02.11.2017

Прийнята до друку: 12.02.2018

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.613

О. В. ЩЕРБИНА^{1*}, А. Г. ШИБАЕВ^{2*}

^{1*}Каф. «Эксплуатация флота и технологии морских перевозок», Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, Одесса, Украина, 65011, тел.+38 (093) 053 57 02, эл. почта olahome@i.ua, ORCID 0000-0001-5029-6098

^{2*}Каф. «Эксплуатация флота и технологии морских перевозок», Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, Одесса, Украина, 65011, тел. (048) 728 31 24, эл. почта safmp@i.ua, ORCID 0000-0002-9886-6069

ЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОТБОРА СУДОВ ДЛЯ СОГЛАСОВАННОЙ РАБОТЫ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Цель. В настоящем исследовании необходимо рассмотреть формирование методики отбора судов при согласованной работе морского и речного транспорта с применением эвристического подхода. **Методика.** Для реализации поставленной в исследовании цели авторами был проведен анализ отечественных и зарубежных литературных источников по теме работы, изучена специфика и условия эффективной работы морских монокорпусных судов и составных баржебуксирных судов. **Результаты.** На основании результатов анализа были сформулированы методы эвристики, обеспечивающие выбор типоразмеров баржебуксирных судов смешанного плавания «река-море» из приоритетного ряда судов наличного флота. Предложенный подход позволяет выполнить отбор судов, в большей степени соответствующих установленной схеме работы. Рациональные сочетания технико-эксплуатационных характеристик таких пар, как «баржи и буксир», «баржебуксирное судно и морское судно», «баржебуксирное судно и ограничивающие характеристики района плавания», являются предпосылкой к увеличению прибыли судоходной компании за счет увеличения провозной способности судов. **Научная новизна.** Авторами впервые был применен эвристический подход к отбору баржебуксирных и морских судов для согласованной работы с выполнением грузовых операций на рейде устьевого порта при перевозке массовых грузов. В основу подхода положен подбор рационального соотношения технико-эксплуатационных характеристик барж и буксиров. Предложенный подход позволяет определить наилучшее сочетание типоразмеров судов при организации совместной работы морского и речного транспорта. При этом обеспечивается непрерывность процесса перевозки грузов, следующих из морских портов в речные, расположенные в глубине страны (и в обратном направлении). **Практическая значимость.** Представленная методика является логическим продолжением цикла работ, выполненных авторами. Полученные результаты также будут применены в последующих личных исследовательских разработках. Кроме того, представленное исследование будет полезным для судоходных компаний, оперирующих баржебуксирным флотом. Также данная методика может быть внедрена в учебный процесс транспортных высших учебных заведений при изучении соответствующих дисциплин.

Ключевые слова: морские и баржебуксирные суда; рейдовая перегрузка; отбор; эвристический подход

Введение

Одним из вариантов согласованной работы морского и речного флота является организация процесса перевозки грузов, следующих по внутренним водным путям на баржебуксирных судах (ББС), и рейдовой перегрузки непосредственно на морское монокорпусное судно. Такая организация транспортного процесса исключает операции складирования в порту и, как следствие,

необходимость хранения грузов для накопления судовой партии. Преимущество такой технологии заключается в том, что грузовые операции в устьевых портах могут выполняться на рейде, где глубины позволяют использовать морские суда большей грузоподъемности.

Известно [1, 6], что эффективность перевозок грузов ББС зависит от рационального использования технических средств. Поскольку работа ББС предполагает формирование состава

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

ва из буксира и нескольких барж, то для обеспечения непрерывности транспортного процесса перевозки грузов при взаимодействии речного и морского транспорта возможно варьирование количеством и технико-эксплуатационными характеристиками (ТЭХ) структурных элементов ББС.

Задача отбора типоразмера ББС является одной из задач организации транспортного процесса, которая предполагает подбор типоразмера судна из возможных вариантов, наилучшим образом соответствующего условиям предстоящей работы. Задача формирования множества вариантов типоразмеров ББС для заданных условий эксплуатации представлена в работе [5].

Таким образом, задача отбора типоразмера ББС из множества возможных, наилучшим образом соответствующего схеме предстоящего рейса, является актуальной.

Анализ литературных данных и постановка проблем. Начало научного обоснования отечественной практики баржебуксирных перевозок судами (ББП) приходится на 20–30 гг. и достигла своего пика к 70–80 гг. XX ст [3]. Однако, повышенный интерес к ББП в последние десятилетия, обоснованный в работах [1, 6], требует совершенствования теоретических основ организации работы ББС с учетом современных условий рынка и текущих технических возможностей, в том числе в судостроении, гидротехнике и пр.

Основы организации работы ББС были разработаны еще в советское время в пиковый период развития ББП и отображены в работах таких ученых, как: М. С. Терятников, А. А. Союзов, А. П. Ирхин, В. К. Щепетов, В. П. Зачесов, Н. А. Юмин, и др. Например, рассмотрены задачи отбора ББС для работы на линиях по критериям оптимальности финансовых показателей и провозной способности судов [2]. Однако, поставленная авторами задача не отражает особенности организации совместной работы ББС и морских судов, учет которых позволит сократить непроизводительные простои флота. Кроме того, в предложенной модели авторами не учитываются ограничения на трассе следования, оказывающие влияние на типоразмер ББС.

В настоящее время исследуются отдельные проблемы, преимущественно носящие инженерно-технический характер эксплуатации ББС

в области судостроения и судовождения [1, 13].

В отечественных трудах ББП практически не рассматриваются. Но в работе [1] представлен частный случай оценки эффективности эксплуатации баржебуксирного состава «Днепро-макс» класса в сравнении с сухогрузными судами, однако не отображающий общие организационные принципы отбора судов для ББП. Также изложена методика выбора варианта организации работы определенных типов ББС по представленным схемам эксплуатации составов с рейдовой перегрузкой на морские суда. Однако автором не определено условие принятия решения по отбору судов для освоения грузопотока.

Кроме обозначенных областей судостроения и судовождения, зарубежные работы также направлены на исследования в следующих направлениях:

- стратегического развития смешанных перевозок «река–море» в целом, в том числе ББП [9, 10, 12, 14, 15];

- интермодальных контейнерных перевозок [8, 11].

Так, в работах [8, 11] изложены методики построения интермодальной сети обслуживания линий при перевозке контейнеров на баржах.

В работах [1, 9, 10] представлены методики выбора судна для плавания по маршруту «река–море» по экономическим показателям работы судов. При решении поставленной задачи в работах [9, 10] выбираются суда и схемы их работы, исходя из представленных в них ограничений.

Таким образом, из анализа приведенных источников видно, что вопросам организации работы ББС при перевозке массовых грузов, а также вопросам согласованной работы морских судов и ББС не уделено должного внимания. Особый интерес вызывают, прежде всего, вопросы, связанные с отбором ББС для организации их работы без закрепления тяги (буксира) за тоннажем (баржами) при рейдовой перегрузке на морские суда.

Цель

Целью настоящего исследования является формирование методики отбора судов при согласованной работе морского и речного транспорта с применением эвристического подхода.

Исходя из цели, поставлены следующие за-

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

дачи исследования:

1) изучение специфики работы судов при взаимодействии морского и речного транспорта;

2) определение условия их эффективной работы;

3) формулирование методов эвристики, обеспечивающие выбор типоразмеров ББС, в большей степени соответствующего установленной схеме работы за счет рационального сочетания ТЭХ барж и буксиров.

Материалы и методы исследования. Для реализации цели, поставленной в исследовании, разработан эвристический подход, который обеспечивает достаточный по отношению к исходной информации уровень достоверности. Кроме того, время, необходимое на решение задачи эвристическим методом, в отличие от задач, основанных на строгих методах оптимизации, в несколько десятков раз меньше. Эвристический подход позволяет сочетать точные математические приемы с процедурами, основанными на интуиции и опыте решения задач этого класса [4].

Таким образом, разработка эвристического подхода для отбора технических средств речных и морских судов при рейдовой перегрузке, является актуальной.

Методика

Предложенный подход основан на ниже следующих принципах организации работы ББС:

1. Лучшим вариантом организации работы ББС является принцип «вертушки» [1], который предполагает наличие в портах отправления и назначения по одной барже (либо готовых к отправлению, либо находящихся под грузообработкой). При необходимости в схему может быть включен промежуточный порт. Таким образом, при описанном варианте ББС «1 букир+3 баржи» один буксир работает совместно с тремя комплектами барж. В международной практике применяются и другие варианты ББС [7].

2. Буксир, как составная часть ББС, представляет собой его наиболее дорогостоящую часть. Поэтому из двух возможных вариантов организации работы буксира: буксир ожидает погрузку (выгрузку) баржи, с которой пришел в порт (вариант 1), и буксир продолжает движение с баржей, которая уже находится в этом

порту (вариант 2) – предпочтение отдается последнему, поскольку, в значительной мере, именно в обеспечении непрерывной работы на ходу дорогостоящей части судна (машинного отделения) заключается эффективность работы ББС.

3. Для обеспечения лучших условий работы каждого типа ББС необходимо принимать во внимание следующие ограничивающие факторы, которые влияют на габаритные размеры и количество барж в составе, а, следовательно, и на грузоподъемность и мощность двигателя буксира:

- интенсивность грузовых работ в портах;
- максимально допустимые габариты судов для захода в порт, прохождения шлюзов, размеры извилистых участков трассы, а также участков прохождения под мостами;
- протяженность участка перехода.

Принимая интенсивность грузовых работ в портах погрузки и выгрузки в определенных портах величиной постоянной, варьировать можно только мощность двигателя и грузоподъемность баржи (комплекта барж).

4. Современные системы соединения барж и буксиров позволяют эксплуатировать ББС не только на речном участке, но и с выходом в море. Таким образом, район плавания также оказывает влияние как на конструктивные элементы судна, так и на количество барж в составе. Однако, в условиях морского плавания возможна лишь комбинация состава ББС, состоящего из одного буксира и одной баржи.

5. Предполагаемая методика действительна как при работе ББС с загрузкой только в одном направлении, при участии одного порта погрузки и одного порта выгрузки, так и с учетом обратного перехода с порожней баржей или с обратной загрузкой между двумя портами. При наличии обратного грузопотока необходимо учитывать общее время стоянок под погрузкой и выгрузкой по каждому порту.

Исходя из вышесказанного, сформулированы следующие методы эвристики, учет которых обеспечивает выбор схемы для работы ББС определенного типоразмера либо выбор типоразмера ББС для определенной схемы работы за счет рационального сочетания технико-эксплуатационных характеристик барж и буксиров:

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

1. Лучшей является та схема, где нет простоя буксира в ожидании освобождения от грузовых операций баржи ($t_{ож}^{букс в(п)}$), т. е. время ожидания буксиром освобождения баржи от погрузочно-разгрузочных работ стремится к нулю, либо должно быть минимальным, и задается границами:

$$0 \leq t_{ож}^{букс в(п)} \leq d_{букс}, \quad (1)$$

где $d_{букс}$ – величина, подлежащая обоснованию и определяемая соотношением доходов ББС от перевозки и расходов буксира на стоянке.

Иначе, время ожидания буксиром освобождения баржи от погрузочно-разгрузочных работ определяется по формуле:

$$t_{ож}^{букс в(п)} = t_{с}^{барж в(п)} - t_{х}^{букс вниз(вверх)}, \quad (2)$$

где $t_{х}^{букс вниз(вверх)}$ – ходовое время буксира вниз (вверх) к устью, сут; $t_{с}^{барж в(п)}$ – время стоянки баржи под выгрузкой (погрузкой), сут;

При положительном значении t – простой в порту отправления, при отрицательном – в порту назначения.

2. Лучшей является та схема, где нет простоя баржи в ожидании освобождения прихода буксира ($t_{ож}^{барж в(п)}$), т. е. время ожидания баржей прихода буксира сводится к нулю. Таким образом, время простоя баржи сводится к нулю, либо должно быть минимальным для чего задается границами:

$$0 \leq t_{ож}^{барж в(п)} \leq d_{барж}, \quad (3)$$

где $d_{барж}$ – величина, подлежащая обоснованию и определяемая соотношением доходов ББС от перевозки к расходам баржи на стоянке.

Иным способом, время простоя баржи в ожидании буксира определяется как

$$t_{ож}^{барж в(п)} = t_{с}^{барж п} - t_{с}^{барж в} \quad (4)$$

или

$$t_{ож}^{барж в(п)} = t_{х}^{букс верх(вниз)} - t_{с}^{барж в(п)} + t_{ож}^{букс в(п)}, \quad (5)$$

где $t_{с}^{барж в(п)}$ – время ожидания буксиром освобождения баржи от погрузочно-разгрузочных работ в порту выгрузки (погрузки), сут; $t_{ож}^{барж в(п)}$ – время ожидания баржей прихода буксира в порту выгрузки (погрузки), сут.

При положительном значении уравнения – простой в порту отправления, при отрицательном – в порту назначения.

3. Интервал отправления ББС из порта отправления при рейдовой перегрузке должен быть равен времени стоянки баржи под выгрузкой в порту назначения:

$$t_{и} = t_{с}^{барж в}, \quad (6)$$

где $t_{и}$ – интервал отправления ББС из порта отправления, сут.

4. Время кругового рейса грузового морского судна кратно целочисленному значению времени кругового (замкнутого) рейса буксира:

$$t_{р}^{м.с} = a \times t_{р}^{букс}, \quad (7)$$

где $t_{р}^{м.с}$ – время кругового рейса морского судна, сут; $t_{р}^{букс}$ – времени кругового (замкнутого) рейса буксира, сут; a – целочисленное значение, равное количеству ББС.

При этом время кругового рейса грузового морского судна определяется из выражения:

$$t_{р}^{букс} = t_{х}^{букс низ} + t_{х}^{букс вверх} + t_{ож}^{букс в(п)}. \quad (8)$$

5. Время загрузки морского судна должно быть кратно целочисленному времени загрузки комплекта барж и определяется необходимым количеством комплектов барж для загрузки морского судна:

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

$$n^c_{\text{барж}} = \frac{Q^{\text{мор}}_c}{Q^{\text{бар}}}, \quad (9)$$

где $Q^{\text{мор}}_c$ – максимально допустимая загрузка морского судна, т; $n^c_{\text{барж}}$ – необходимое количество комплектов барж для загрузки морского судна; $Q^{\text{бар}}$ – максимально допустимая загрузка комплекта барж (максимальное возможное количество груза, которое может быть принято на судно в данных условиях его работы), т.

Методика определения времени максимальной допустимой загрузки комплекта барж, исходя из ограничений, изложена в работе [5]. По аналогии определяется максимально допустимая загрузка морского судна.

Результаты

Наглядно рассмотренные методы эвристики представлены в виде блок-схемы на рис. 1.

При решении каждого логического блока с положительным результатом (критерий к) присваивается значение «+», с отрицательным (критерий g) – значение «-». Обработка результатов проводится по максимальному суммарному значению критерия к. При равных результатах для нескольких ББС формируется график для этих типов ББС. Окончательный отбор судна производится по экономическим показателям. Исходя из решаемой в исследовании задачи, рассматриваются схемы ℓ и баржебуксирные суда типа z ($\ell=1, \bar{L}$; $z=1, \bar{Z}$).

Научная новизна и практическая значимость

Авторами впервые был применен эвристический подход к отбору баржебуксирных и морских судов для согласованной работы с выполнением грузовых операций на рейде устьевого порта. В основу подхода положен подбор рационального соотношения ТЭХ барж и буксиров. Предложенный подход позволяет определить наилучшее сочетание типоразмеров судов при организации совместной работы морского и речного транспорта, тем самым обеспе-

чивая непрерывность процесса перевозки грузов, следующих из морских портов в речные, расположенные в глубине страны (и в обратном направлении).

Полученные результаты будут применены в личных исследовательских разработках. Кроме того, представленное исследование может быть полезным для судоходных компаний, оперирующих баржебуксирным флотом, а также методика может быть внедрена в учебный процесс при изучении дисциплины «Основы теории транспортных процессов и систем (Организация работы флота)».

Выводы

В ходе рассмотренного исследования был проведен анализ литературных источников и выявлено следующее:

А. Исследования по рассматриваемой проблематике в отечественной литературе несколько устарели;

Б. Зарубежные исследования проводятся и широко освещаются преимущественно в направлениях:

- 1) ББП грузов в контейнерах в различных районах плавания;
- 2) технической реализации возможности эксплуатации ББС в различных путевых условиях.

В. Подтверждена актуальность темы исследования.

Рассматриваемая в статье задача входит в комплекс задач организации работы баржебуксирного флота.

Приведенный в работе эвристический подход к отбору судов для работы по схеме (схемам):

1) обеспечивает непрерывный процесс перевозки грузов по внутренним водным путям, минимизирует задержки судов в транзитных портах, обеспечивает регулярную подачу судов.

2) позволяет определить наилучшее сочетание количества технических средств при планировании работы морского и речного транспорта.

В результате исследований составляется приоритетный ряд из типоразмеров ББС для работы на линии.

Дальнейшее развитие методики предполагает оценку целесообразности эксплуатации ББС типа z из приоритетного ряда на линии.

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

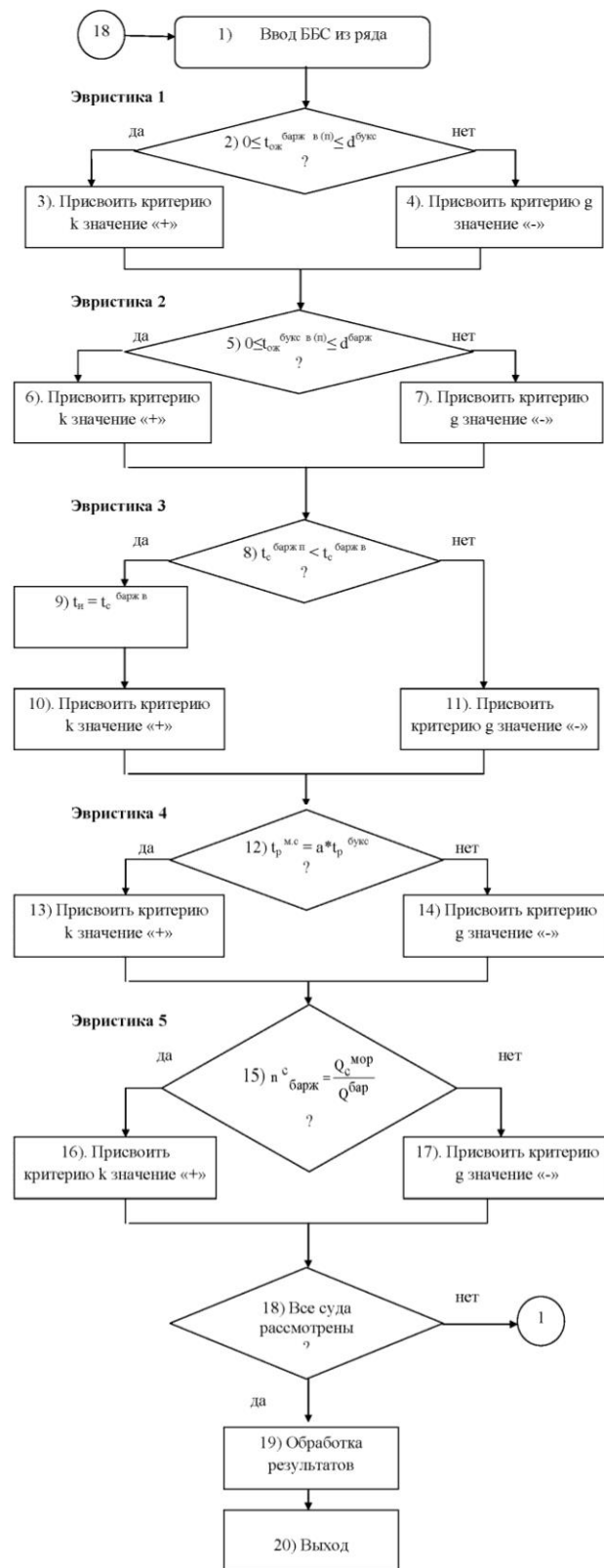


Рис. 1. Состав и последовательность операций отбора судов с помощью эвристического подхода

Fig. 1. Composition and sequence of ship selection operations using a heuristic approach

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Єгоров, О. Г. Вибір оптимальних характеристик составних суден і барже-буксирних составів змішаного плавання : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.19 / Єгоров Олександр Геннадійович ; Одес. нац. мор. ун-т. – Одеса, 2016. – 495 с.
2. Союзов, А. А. Внедрение разработок по оптимальному распределению буксирно-баржевого флота в советском дунайском пароходстве / А. А. Союзов, Е. С. Коврига // Экономика и эксплуатация морского транспорта : сб. науч. тр. – Москва, 1971. – Вып.8. – С. 24–35.
3. Трифонов, А. В. Концепция создания судов для комплексного освоения малых рек классов VIIа и VIIб : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.19 / Трифонов Андрей Владимирович ; Моск. гос. акад. водн. трансп. – Москва, 2002. – 256 с.
4. Шибаев, А. Г. Подготовка и обоснование решений по управлению перевозками и работой флота морской судоходной компании : монография / А. Г. Шибаев. – Одесса : ХОРС, 1998. – 208 с.
5. Щербина, О. В. Определение типоразмера барже буксирного состава / О. В. Щербина // Вісн. Східно-укр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2017. – № 4 (234). – С. 248–253.
6. Щербина, О. В. Формування переваг використання барже буксирних суден для міжнародних перевезень українських експортних вантажів / О. В. Щербина, О. В. Акімова // Зб. наук. пр. SWord. – Одеса, 2015. – № 1 (38). – С. 19–24.
7. Циклическая работа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.articouple.com/rus/20-cyclic.html>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.12.2017.
8. Caris, A. Modeling corridor networks in intermodal barge transport [Электронный ресурс] / A. Caris, C. Macharis, G. Janssens. – 2010. – Режим доступа: <http://www.wctrs-society.com/wp/wp-content/uploads/abstracts/lisbon/selected/01919.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.12.2017.
9. Kaup, M. Functional model of river-sea ships operating in European system of transport corridors: Part I. Methods used to elaborate functional models of river-sea ships operating in European system of transport corridors / M. Kaup // Polish Maritime Research. – 2008. – Vol. 15. – Iss. 3. – P. 3–11. doi: 10.2478/v10012-007-0077-y.
10. Kaup, M. Functional model of river-sea ships operating in European system of transport corridors: Part II. Methods of determination of design assumptions for river-sea ships operating in European system of transport corridors, according to their functional model / M. Kaup // Polish Maritime Research. – 2008. – Vol. 15. – Iss. 4. – P. 3–11. doi: 10.2478/v10012-007-0090-1.
11. Konings, R. Hub-and-spoke networks in container-on-barge transport / R. Konings // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2006. – Vol. 1963. – С. 23–32. doi: 10.3141/1963-04.
12. Malchow, U. Port Feeder Barge: Advanced Waterborne Container Logistics for Ports / U. Malchow // TransNav: Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2014. – Vol. 8. – Iss. 3. – P. 411–416. doi: 10.12716/1001.08.03.12.
13. Stoop, J. A. Safe and swift performance, a conceptual assessment of a new river sea pusher system / J. Stoop, M. B. Duinkerken // Intern. Conference on Safety and Operations in Canals and Waterways (15–16th September 2008, Glasgow, UK) / University of Strathclyde and Glasgow. – Glasgow, 2008. – С. 50–59.
14. Šoškić, S. Analysis of River–Sea Transport in the Direction of the Danube–Black Sea and the Danube Rhine River Main / S. Šoškić, Z. Đekić, M. Kresojević // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2014. – Vol. 8. – Iss. 4. – P. 523–531. doi: 10.12716/1001.08.04.06.
15. Wiegman, B. W. Strategies and innovations to improve the performance of barge transport / B. W. Wiegman, R. Konings // European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR). – 2007. – No. 2. – P. 145–162.

О. В. ЩЕРБИНА^{1*}, О. Г. ШИБАЄВ^{2*}

^{1*}Каф. «Експлуатація флоту і технології морських перевезень», Одеський національний морський університет, вул. Мечнікова, 34, Одеса, Україна, 65011, тел. + 38 (093) 053 57 02, ел. пошта olahome@rambler.ru, ORCID 0000-0001-5029-6098

^{2*}Каф. «Експлуатація флоту і технології морських перевезень», Одеський національний морський університет, вул. Мечнікова, 34, Одеса, Україна, 65011, тел. (048) 728 31 24, ел. пошта safmpr@i.ua, ORCID 0000-0002-9886-6069

ЕВРИСТИЧНИЙ МЕТОД ВІДБОРУ СУДЕН ДЛЯ УЗГОДЖЕНОЇ РОБОТИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. У даному дослідженні необхідно розглянути формування методики відбору суден при узгодженій роботі морського та річкового транспорту зі застосуванням евристичного підходу. **Методика.** Для реалізації поставленої у дослідженні мети авторами було проведено аналіз вітчизняних і зарубіжних літературних джерел за темою роботи, вивчено специфіку та визначено умови ефективної роботи морських монокорпусних та складених баржебуксирних суден. **Результати.** На підставі результатів аналізу були сформульовані методи евристики, що забезпечують вибір типорозмірів баржебуксирних суден змішаного плавання «ріка-море» з пріоритетного ряду суден наявного флоту. Запропонований підхід дозволяє виконати відбір суден, що в більшій мірі відповідають встановленій схемі роботи. Раціональні поєднання техніко-експлуатаційних характеристик таких пар, як «баржі і буксир», «баржебуксирне судно і морське судно», «баржебуксирне судно і характеристики, що обмежують район плавання», є передумовою до збільшення прибутку судноплавної компанії за рахунок збільшення провізної здатності суден. **Наукова новизна.** Авторами вперше був застосований евристичний підхід до відбору баржебуксирних та морських суден для узгодженої роботи з виконанням вантажних операцій на рейді гирлового порту при перевезенні масових вантажів. В основу підходу покладено підбір раціонального співвідношення техніко-експлуатаційних характеристик барж і буксирів. Запропонований підхід дозволяє визначити оптимальне поєднання типорозмірів суден при організації спільної роботи морського та річкового транспорту. При цьому забезпечується безперервність процесу перевезення вантажів, що прямують із морських портів у річкові, розташовані в глибині країни (і в зворотному напрямку). **Практична значимість.** Представлена методика є логічним продовженням циклу робіт, виконаних авторами. Отримані результати також будуть застосовані в наступних особистих дослідних розробках. Крім того, представлено дослідження буде корисним для судноплавних компаній, що оперують баржебуксирним флотом. Також дана методика може бути впроваджена в навчальний процес транспортних вищих навчальних закладів при вивченні відповідних дисциплін.

Ключові слова: морські та баржебуксирні судна; рейдове перевантаження; відбір; евристичний підхід

O. V. SHCHERBINA^{1*}, A. G. SHIBAEV^{2*}

^{1*}Dep. «Fleet Operation and Technology of Sea Transportations», Odessa National Maritime University, Mechnikov St., 34, Odessa, Ukraine, 65011, tel. +38 (093) 053 57 02, e-mail olahome@rambler.ru, ORCID 0000-0001-5029-6098

^{2*}Dep. «Fleet Operation and Technology of Sea Transportations», Odessa National Maritime University, Mechnikov St., 34, Odessa, Ukraine, 65011, phone: +38 (048) 728 31 24, e-mail cafmp@i.ua, ORCID 0000-0002-9886-6069

HEURISTIC METHOD OF SHIPS SELECTION FOR THE COORDINATED WORK OF WATER TRANSPORT

Purpose. The study aims to develop a formulation methodology for ship selection in the coordinated work of sea and river transport using a heuristic approach. **Methodology.** To realize the purpose set in the study, the authors carried out an analysis of domestic and foreign literature sources on the current topic, studied specifics and conditions for the effective operation of marine mono-hulled ships and composite tug/barge towing ones. **Findings.** The analysis results allowed formulating the heuristics methods that ensure the selection of the type sizes of tug/barge towing ships for the mixed «river-sea» navigation from the priority range of ships of the existing fleet. The proposed method makes it possible to select ships in a more appropriate manner according to the established scheme of work. Rational combinations of technical and operational characteristics of such pairs as «barges and tows», «tug/barge towing ship and sea-going ship», «tug/barge towing ship and restrictive characteristics of the area of navigation» are a prerequisite for the shipping company profit growth by increasing the capacity of ships. **Originality.** For the first time, the authors applied a heuristic approach to the selection of tug/barge towing ships and sea-going ones for coordinated work with the performance of cargo operations on the raid of the estuary port when transporting bulk goods. The basis of the approach is the selection of a rational mix of technical and operational characteristics of barges and tugs. The proposed approach allows determining the best combination of ship type sizes in the organization of coordinated work of sea and river transport. At the same time, the continuity of the goods transportation process from the sea ports to the river ones located in the depth of the country (and in the opposite direction) is ensured. **Practical value.** The presented methodology is a logical continuation of the cycle of studies performed by the au-

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

thors. The obtained results will also be applied in subsequent personal research developments. In addition, the presented research may be useful for shipping companies that run the tug/barge towing fleet. The presented methodology may also be introduced into the learning process of transport higher education institutions in the study of relevant disciplines.

Keywords: sea-going and tug/barge towing ships; raid overload; selection; heuristic approach

REFERENCES

1. Yegorov, O. H. (2016). *Vybir optymalnykh kharakterystyk sostavnykh suden i barzhe-buksyrnykh sostaviv zmishanoho plavannia*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Odessa National Maritime University. (in Ukrainian)
2. Soyuzov, A. A., & Kovriga, Y. S. (1971). Vnedreniye razrabotok po optimalnomu raspredeleniyu buksirno-barzhevogo flota v sovetskom dunayskom parakhodstve. *Ekonomika i ekspluatatsiya morskogo transporta*, 8, 24-35. (in Russian)
3. Trifonov, A. V. (2002). *Kontseptsiya sozdaniya sudov dlya kompleksnogo osvoeniya malykh rek klassov VIIa i VIIb*. (Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk). Moscow State Academy of Water Transport. (in Russian)
4. Shibayev, A. G. (1998). *Podgotovka i obosnovanie resheniy po upravleniyu perevozkami i rabotoy flota morskoy sudokhodnoy kompanii: Monografiya*. Odessa: KhORS. (in Russian)
5. Shcherbina, O. V. (2017). Opredelenie tiporazmera barzhe buksirnogo sostava. *Visnyk Skhidnoukrais'koho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia*, 4(234), 248-253. (in Russian)
6. Shcherbyna, O. V. & Akymova, O. V. (2015). Formuvannia perevah vykorystannia barzhe buksyrnykh suden dlia mizhnarodnykh perevezen ukrainskykh eksportnykh vantazhiv. *Zbirnyk naukovykh prats SWord*, 1(38), 19-24. (in Ukrainian)
7. *Tsiklicheskaya rabota*. Retrived from <http://www.articouple.com/rus/20-cyclic.html>. (in Russian)
8. Caris, A., Macharis, C., & Janssens, G. (2010). Modelling corridor networks in intermodal barge transport. Retrieved from <http://www.wctrs-society.com/wp/wp-content/uploads/abstracts/lisbon/selected/01919.pdf>. (in English)
9. Kaup, M. (2008). Functional model of river-sea ships operating in European system of transport corridors: Part I. Methods used to elaborate functional models of river-sea ships operating in European system of transport corridors. *Polish Maritime Research*, 15(3), 3-11. doi: 10.2478/v10012-007-0077-y. (in English)
10. Kaup, M. (2008). Functional model of river-sea ships operating in European system of transport corridors: Part II. Methods of determination of design assumptions for river-sea ships operating in European system of transport corridors, according to their functional model. *Polish Maritime Research*, 15(4), 3-11. doi: 10.2478/v10012-007-0090-1. (in English)
11. Konings, R. (2006). Hub-and-spoke networks in container-on-barge transport. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1963, 23-32. doi: 10.3141/1963-04. (in English)
12. Malchow, U. (2014). Port Feeder Barge: Advanced Waterborne Container Logistics for Ports. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 8(3), 411-416. doi: 10.12716/1001.08.03.12. (in English)
13. Stoop, J. A., & Duinkerken, M. B. (2008). Safe and swift performance, a conceptual assessment of a new river sea pusher system. *International Conference on Safety and Operations in Canals and Waterways*, 50-59. (in English)
14. Šoškić, S., Đekić, Z., & Kresojević, M. (2014). Analysis of River–Sea Transport in the Direction of the Danube–Black Sea and the Danube Rhine River Main. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 8(4), 523-531. doi: 10.12716/1001.08.04.06. (in English)
15. Wiegman, B. W., & Konings, R. (2007). Strategies and innovations to improve the performance of barge transport. *European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR)*, 2, 145-162. (in English)

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. П. Сторожевым (Украина); д.т.н., проф. Д. Н. Козаченко (Украина)

Поступила в редколлегию: 09.10.2017

Принята к печати: 08.01.2018

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

UDC 629.45.048.7

E. V. BILOSHYTSKYI^{1*}

MATHEMATICAL MODEL OF UNSTEADY HEAT TRANSFER OF PASSENGER CAR WITH HEATING SYSTEM

^{1*} «Project Design and Technological Bureau», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 371 51 12, e-mail e.beloshickiy@gmail.com, ORCID 0000-0002-2424-8479

Purpose. The existing mathematical models of unsteady heat processes in a passenger car do not fully reflect the thermal processes, occurring in the car with a heating system. In addition, unsteady heat processes are often studied in steady regime, when the heat fluxes and the parameters of the thermal circuit are constant and do not depend on time. In connection with the emergence of more effective technical solutions to the life support system there is a need for creating a new mathematical apparatus, which would allow taking into account these features and their influence on the course of unsteady heat processes throughout the travel time. The purpose of this work is to create a mathematical model of the heat regime of a passenger car with a heating system that takes into account the unsteady heat processes. **Methodology.** To achieve this task the author composed a system of differential equations, describing unsteady heat processes during the heating of a passenger car. For the solution of the composed system of equations, the author used the method of elementary balances. **Findings.** The paper presents the developed numerical algorithm and computer program for simulation of transitional heat processes in a locomotive traction passenger car, which allows taking into account the various constructive solutions of the life support system of passenger cars and to simulate unsteady heat processes at any stage of the trip. **Originality.** For the first time the author developed a mathematical model of heat processes in a car with a heating system, that unlike existing models, allows to investigate the unsteady heat engineering performance in the cabin of the car under different operating conditions and compare the work of various life support systems from the point of view their constructive solutions. **Practical value.** The work presented the developed mathematical model of the unsteady heat regime of the passenger car with a heating system to estimate the efficiency of unsteady, transitional temperature states in passenger cars, taking into account the design features of the heating system and the regulatory requirements. This allows the development and implementation of optimal technical characteristics of heating appliances and the construction of an algorithm for controlling their operation in accordance with operating conditions, taking into account the thermal inertia of the car in the transitional modes of heating, on the basis of mathematical modeling.

Keywords: mathematical modelling; passenger car; unsteady heat processes; heating system

Introduction

At present, mathematical modelling is widely used to assess the effectiveness of various constructive solutions. A peculiarity of mathematical modelling is the large amount of computational work; therefore, recently, in terms of accessibility and improvement of the capabilities of computer technology, numerical experiment has become widespread. Mathematical modelling with the use of adequate mathematical models has much in

common with the field experiment. This way of research allows simulating the processes that arise in the actual operation of separate equipment and life support systems in general, as well as the impact of various factors thereon. The basis of mathematical modelling is the method of differential balance equations [11].

The mathematical modelling of heat processes in passenger cars with heating systems is usually realized in steady regime, when the heat fluxes and parameters of the thermal circuit are constant, do

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

not depend on time. The steady regime refers to the situation in the car, when there is balance between the thermal energy that comes in and that given by fencing structures into the environment. The energy balance of such a system in a steady regime is studied quite well [4-8, 12]. But, any heat exchange is dynamic, and it is not enough to describe a single steady regime. The worse situation is with the analysis of the thermal condition of heated cars in unsteady conditions, in particular, when the heating of high-voltage heating systems is switched off in motion and in parking places with further heating, resulting in transitional heating regimes.

The mathematical model of the car heat condition, when the car is heated with an air heating system, is considered in the works [14, 16, 17], the model, when a car air conditioner operates in the heat pump mode, is considered in the works [3, 13]. The works [2, 15] present a mathematical modelling of unsteady heat exchange processes of a passenger car with air conditioning systems. These mathematical models are similar to each other, and allow the insertion and extraction of additional elements into the calculation scheme rather easily, but the air flow is used for heating and cooling as a coolant. The presented mathematical models do not fully reflect the thermal processes occurring in the car when using a water heating system, where the intermediate coolant is water. There are no such indicators as heat energy accumulation [1].

The works devoted to passenger car heating systems indicate that a car needs the heating system with capacity of 48 kW in the winter period. These requirements were substantiated in the 70-80s of the last century for cars with an effective thermal conductivity of about $1.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ with the environment temperature of -40°C in winter, with a number of passengers from 32 to 60 people (considered by Kitayev B. N. [6, 7], Kuzmin L. D. [11], Zharikov V. A. [4, 5], Sidorov Yu. P. [10] and other researchers).

Already at the beginning of the 21st century, the car builders of PJSC «Kryukov Railway Car Building Works» reached an effective conductivity in a passenger car of about $(0.8 \div 1.0) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, and the installation of double-glazed windows significantly increased its tightness.

Thus, taking into account the car structural changes and the new trends, a more thorough ana-

lysis of the car heat regime is required, taking into account the unsteadiness of the process, when heating the passenger car.

Purpose

The purpose of this study was to create a mathematical model of the unsteady heat regime of a passenger car with a water heating system to evaluate the role of unsteady, transitional temperature states of the passenger car, the selection of optimal technical characteristics of heating devices, and constructing an algorithm for their operation control in accordance with operating conditions, and particularly taking into account the manifestation of the car thermal inertia during the transitional operating modes of the heating system.

Methodology

To achieve the set task the author composed a system of differential equations, describing unsteady heat processes during the heating of a passenger car. For the solution of the composed system of equations, the author used the method of elementary balances.

When studying the transitional regimes in the process of cooling and subsequent heating of a passenger car during the operation, the conditions are taken into account when the heat from the TEHs (tubular electric heaters) is perceived by the intermediate coolant and then transmitted to the car. The same is when the car is cooled from the initial temperature to the critical, at which the next heating process begins. The dynamic equation of the temperature process in this case should be solved in two stages: in relation to the intermediate coolant, and from the coolant to the air in the car and then to the outside air.

During formation of the car heat model, physically grounded and experimentally confirmed features of the car heat condition were taken into account, namely:

- temperature of the interior partitions of the car practically coincides with the temperature of the car air;
- difference between the internal partition wall with the temperature t_p and the average air temperature t_a in the car does not exceed 3 K, since the temperature difference between the external environment with the temperature t_e and the car air

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

with the temperature t_c is mainly damped on its thermal insulation;

– temperature of the air removed from the car through deflectors is equal to the air temperature in the car t_a .

– due to increasing the coefficient of heat transfer by convection on the outer surfaces of the partitions, depending on the car speed from 0 to 80 km/h, the heat transfer of the car body increases by 10%, at speeds from 80 to 160 km/h, the coefficient increases by 1%;

– air infiltration volume, depending on the car speed up to 120 km/h, can reach 325 m³/h;

The physical essence of these equations is reduced to the following.

The heat flow is evolved from TEHs $Q_{TEH}(\tau)$ in the time interval τ , is transmitted to the intermediate coolant and the metal structure of the heating system. Since the heating devices can not physically transfer the entire heat flow $Q_{TEH}(\tau)$ evolved from TEHs, part of this heat is accumulated in the coolant and the metal structure of the heating system Q_{hs} .

In accordance with the energy conservation law (heat balance), the heat flow $Q_{TEH}(\tau)$ is consumed on four main components:

$$Q_{TEH}(\tau) = Q_{hs} + Q_{pp} + Q_{cl} + Q_{bl}, \quad (1)$$

where Q_{hs} – heat accumulated by heating system; Q_{pp} – heat consumed by heating pipes; Q_{cl} – heat consumed by the coolant to heat the outdoor air; Q_{bl} – heat consumed for water heating for hot water supply, as the boiler does not affect the microclimate in the car and has a slight consumption of heat, this parameter will not be taken into account further.

The listed components are determined by the relationships:

$$Q_{hs} = C_{hs} \frac{dt}{d\tau}, \quad (2)$$

$$Q_{pp} = c_w G_w (t_{in} - t_{out}), \quad (3)$$

$$Q_{cl} = c_w G_w (t_{in} - t_{out}), \quad (4)$$

where C_{hs} – total heat capacity of the water and the metal structure of the heating system; t_{in} – coolant temperature at the inlet to the heating pipes and heater; t_{out} – coolant temperature at the outlet from the heating pipes is determined by the formula:

$$t_{out} = t_a + (t_0 - t_a) e^{-al}, \quad (5)$$

where t_0 – coolant temperature at the inlet to the heating pipes; t_a – room air temperature; l – length of the heating pipes; a – coefficient determined by the expression:

$$a = -\frac{4k_{pp}D_o}{c_w \rho_w D_i^2 \omega_w}, \quad (6)$$

where k_{pp} – coefficient of heat transfer of heating pipes; D_o , D_i – outside and inside diameter of the heating pipes; ρ_w – coolant density; ω_w – coolant speed in the heating pipes.

To analyse the heating regime of the car heating system, the equation (1) ÷ (3) must be supplemented by another equation that is used to calculate the heating and cooling of the heating system coolant from a given initial temperature $t(0)$ to a certain final temperature t_b for a short period of time τ , at any stage and has the form:

$$t_b(\tau) = t(0) + \frac{Q_{TEH} - (Q_{pp} + Q_{cl})}{C_{hs}} \tau. \quad (7)$$

The amount of heat entering the car from $Q_{pp}(\tau)$, as can be seen from equation (3), depends on the coolant temperature, the heating pipes area, the heat transfer coefficient k_{pp} , the rate of coolant circulation in the heating pipes. The heat $Q_a(\tau)$, evolved by the air flow V_o at the time τ , is uniquely associated with the change in its enthalpy and is determined by the relation:

$$Q_a(\tau) = (I(t_a^c \phi_a^c) - I(t_a \phi_a)) \rho_a V_o(\tau), \quad (8)$$

where $I(t_a^c \phi_a^c)$ – specific enthalpy, temperature and relative humidity of air entering the car after heating in calorifer; $I(t_a \phi_a)$ – specific enthalpy, temperature and relative humidity of air in the car; V_o – volume of outside air supplied by the ventilation system; to determine the specific enthalpy of air $I d$ – wet air diagram is used; t_a^c – air temperature heated by the calorifer is determined by the expression:

$$t_a^c = \frac{c_w G_w (t_{in} - t_{out})}{c_a \rho_a V_o} + t_o. \quad (9)$$

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The heat brought by the heated outside air can be determined by another less precise expression:

$$Q_a(\tau) = c_a \rho_a V_o (t_a^c - t_a)(\tau), \quad (10)$$

The heat flows $Q_{pp}(\tau)$, $Q_a(\tau)$, $Q_l(\tau)$, entering the car at the time τ , are absorbed by three components:

$$(Q_l + Q_a + Q_{pp})(\tau) = Q_{los} + Q_{inf} + Q_{car}, \quad (11)$$

where Q_{los} – heat lost by partitions, as well as windows; Q_{inf} – heat consumed for heating of the cold air, which penetrates through the body imperfections and is characterized by $V_{inf}(S)$, that is, by the volume of infiltrated air, depending on the speed of movement; Q_{car} – heat consumed for heating the internal air and equipment of the car.

The listed components are determined by the relationships:

$$Q_{los} = k_o F_o (t_a - t_e), \quad (12)$$

$$Q_{inf} = c_a \rho_a V_{inf} (t_a - t_e), \quad (13)$$

$$Q_{car} = C_{car} \frac{dt}{d\tau}, \quad (14)$$

where k_o – coefficient of heat transfer through outer lining; F_o – area of outer lining; t_a – room air temperature; t_e – environment temperature; c_a – heat capacity of air; V_{inf} – volume of air entered into the car as a result of infiltration; C_{car} – total heat capacity of all internal partitions, wooden lining of external car frame and half heat capacity of the heat-shielding layer.

For an integrated analysis of the car heat regime we need one more equation to calculate the heating and cooling of the car air temperature from a given initial temperature $t(0)$ to a certain final temperature t_a for a short period of time τ , has the form:

$$t_a(\tau) = t(0) + \left(\frac{(Q_{pp} + Q_c + Q_l) - (-Q_{los} + Q_{inf})}{C_{car}} \right) \tau. \quad (15)$$

It is advisable to highlight several of the most characteristic stages of the car heat regime, within each of which almost constant values of the output parameters are kept:

$$c_a; c_w; \rho_a; \rho_w; k_o; F_o; \phi_a; C_{car}; C_{hs}; G_w = \text{const} \quad (16)$$

With restrictions (16), equation (7) (15) has at its separate stage its own, individual analytical solution of the form:

The equation describing the change in air temperature (15) takes the form of:

$$\frac{dt_a}{d\tau} = \frac{Q_{pp} + (Q_l + Q_a - Q_{inf}) - Q_{los}}{C_{car}}, \quad (17)$$

where the step part depends on both t_a , and $t_{in} = t_b$.

So, this is the equation of two variables:

$$t_a = t_a(\tau) \text{ and } t_{in} = t_b(\tau)$$

The equation describing the temperature of the coolant in the boiler (7) takes the form:

$$\frac{dt_b}{d\tau} = \frac{Q_{TEH} - (Q_{pp} + Q_{cl})}{C_{hs}}, \quad (18)$$

where the right side also depends on t_a and t_b .

Consequently, we have a system of two differential equations with two variables:

$$\begin{cases} \frac{dt_a}{d\tau} = \frac{Q_{pp} + (Q_l + Q_a - Q_{inf}) - Q_{los}}{C_{car}}; \\ \frac{dt_b}{d\tau} = \frac{Q_{TEH} - (Q_{pp} + Q_{cl})}{C_{hs}}. \end{cases} \quad (19)$$

The grouping of the right-hand sides of the equations with respect to the variables t_a and t_b and after transformations has the form:

$$\begin{pmatrix} (C_w G_w - e^{-al} \cdot C_w G_w) t_b + \\ (C_w G_w e^{-al} - C_w G_w - k_o F_o) \times \\ t_a + (Q_l + Q_a - Q_{inf}) + \\ k_o F_o t_o \end{pmatrix} / C_{car} = \quad (20)$$

$$= \varepsilon_1 t_b + o_1 t_a + \theta_1$$

where ε_1, o_2 – indicators of car thermal inertia at the considered stage; θ_1 – index of car heat entropy at the considered stage:

$$\varepsilon_1 = \frac{C_w G_w (1 - e^{-al})}{C_{car}}, \quad (21)$$

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$o_1 = \frac{C_w G_w \cdot (e^{-al} - 1) - k_o F_o}{C_{car}}, \quad (22)$$

$$\theta_1 = \frac{(Q_l + Q_a - Q_{inf}) + k_o F_o t_e}{C_{car}}, \quad (23)$$

$$\frac{(e^{-al} - 1)C_w G_w t_b + (1 - e^{-al})C_w G_w t_a}{C_{hs}} + \frac{Q_{TEH} - Q_{cl}}{C_{hs}} = \varepsilon_2 t_b + o_2 t_a + \theta_2, \quad (24)$$

where ε_2, o_2 – indicators of thermal inertia of the heating system at the considered stage; θ_2 – indicator of heat entropy of the heating system at the considered stage.

$$\varepsilon_2 = \frac{(e^{-al} - 1)C_w G_w}{C_{hs}}, \quad (25)$$

$$o_2 = \frac{(1 - e^{-al})C_w G_w}{C_{hs}}, \quad (26)$$

$$\theta_2 = \frac{Q_{TEH} - Q_{cl}}{C_{hs}}. \quad (27)$$

Thus, the initial system of equations has the form:

$$\begin{cases} \frac{dt_a}{d\tau} = \varepsilon_1 t_b + o_1 t_a + \theta_1; \\ \frac{dt_b}{d\tau} = \varepsilon_2 t_b + o_2 t_a + \theta_2, \end{cases} \quad (28)$$

That is, linear equations with constant coefficients.

The linear non-homogeneous second-order equation with third-order coefficients has the form:

$$t_b'' + p \cdot t_b' + g \cdot t_b = f, \quad (29)$$

where

$$p = -(o_1 + \varepsilon_2), \quad (30)$$

$$g = o_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_1 o_2, \quad (31)$$

$$f = o_2 \theta_1 - o_1 \theta_2. \quad (32)$$

Discriminator of the characteristic equation:

$$D = p^2 - 4g. \quad (33)$$

The solution of homogeneous equations for the boiler and the car room temperature has the form:

$$t_b(\tau) = K_1 e^{R_1 \tau} + K_2 e^{R_2 \tau} + \frac{f}{g}, \quad (34)$$

$$t_a(\tau) = \frac{K_1 R_1 e^{R_1 \tau} + K_2 R_2 e^{R_2 \tau} - A_2 t_b - C_2}{B_2}. \quad (35)$$

where R_1, R_2 are the roots of the characteristic equation:

$$R_1 = \frac{-p - \sqrt{D}}{2}, \quad (36)$$

$$R_2 = \frac{-p + \sqrt{D}}{2}, \quad (37)$$

$$K_1 = \left[\begin{array}{c} o_2 t_a(0) + \theta_2 + \varepsilon_1 \cdot \frac{f}{g} - \\ -(R_2 - \varepsilon_2) \cdot \left(t_b(0) - \frac{f}{g} \right) \end{array} \right] / (R_1 - R_2), \quad (38)$$

$$K_2 = t_b(0) - \frac{f}{g} - K_1. \quad (39)$$

The expressions (34), (35) allow us to estimate not only the temperature of the coolant in the combined electric-coal boiler and the air inside the car, but also to carry out a comprehensive analysis of the heat processes while heating the passenger car, taking into account the structural changes and the unsteadiness of the processes, and evaluate the efficiency of the system «heating system – passenger car». To do this, the initial temperatures $t_b(0), t(0)$ of the boiler and inside the car at this stage and the value of the output parameters should be known.

Approbation of the mathematical model when compared with experimental data. The mathematical model described above allowed constructing a calculated model of the car temperature condition, using a water heating system with natural circulation and a discrete two stage high-power heat supply (2 groups of 24 kW).

For simplicity, the infiltration volume was taken from the average speed of movement. The heat capacity of the internal equipment and the heating system is taken in the water equivalent. Heat-efficiency

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

of the combined water-heating boiler is 24+24 kW. The work of the ventilation system was not taken into account; it was not switched on during the experiment.

The dimensions and physical parameters of the elements used to construct the calculation model are given.

The model approbation used the experimental data obtained by the author. The experiment was conducted during train movement, the car number 26487, manufactured at «KVZ» in 1985, overhaul reconditioning on 10.12.2014. Measurement of

temperatures was carried out by stationary means, the temperature of the car air was measured by two thermometers located on the boiler and no-boiler side of the car, the temperature of the coolant in the boiler was measured by a regular remote thermometer with a remote sensor.

As can be seen from the data given in Fig. 1, the modelling results quite well coincide with the results of the experiment, that is, the constructed model can be considered rather accurate and used for theoretical studies.

Input data for the calculation model

Body area, m ²	330
Coefficient of heat transfer of partitions, taking into account the speed of movement	1.3
Infiltration volume, m ³ /h	200
Area of heating pipes, taking into account the coefficient of finning, m ² ·k _{fin}	19.5·2.9
Coolant circulation velocity, m/s	0.04
Number of passengers, people	52
Car heat capacity, C _{car} , kW	3056
Heat capacity of the heating system, C _{hs} , kW	1000
Coefficient of heat transfer of heating pipes, W/m ² ·K	10.8

Findings

The computational algorithm allowed developing a computer program for conducting a complex analysis of heat processes during the heating of a passenger car, taking into account structural changes and unsteadiness of processes, estimation of the efficiency of the system «heating system – passenger car».

Originality and practical value

The mathematical model of the unsteady heat regime of the passenger car with a water heating system was developed for evaluation of the role of unsteady, transitional temperature states of a passenger car, taking into account the features that are determined by existing requirements. This allowed the selection of optimal technical characteristics of heating devices and the construction of an algorithm for controlling their operation, in accordance with the operating conditions, including in view of the car thermal inertia at the transitional operating modes of the heating system. For the mathematical

modelling of unsteady heat regime of a passenger car with a water heating system, the method of elementary balance was applied. The model makes it possible to simulate the operation of the heating system, to conduct a comprehensive analysis of the thermal processes in the passenger car heating, taking into account the structural changes and unsteadiness of the processes and evaluate the efficiency of their work.

Conclusion

The paper presented a mathematical model of unsteady heat exchange processes in passenger cars when using the heating systems. There were analysed the existing mathematical models, which do not fully reflect the thermal processes occurring in the car using a water heating system, where the intermediate coolant is water. The system of differential equations that characterize the unstable processes of heat transfer in a passenger car allowed developing a computational algorithm. The computer program was developed for the complex analysis of thermal processes during passenger car

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

heating, taking into account structural changes and unsteadiness of processes, estimation of operation

efficiency, by means of a mathematical experiment.

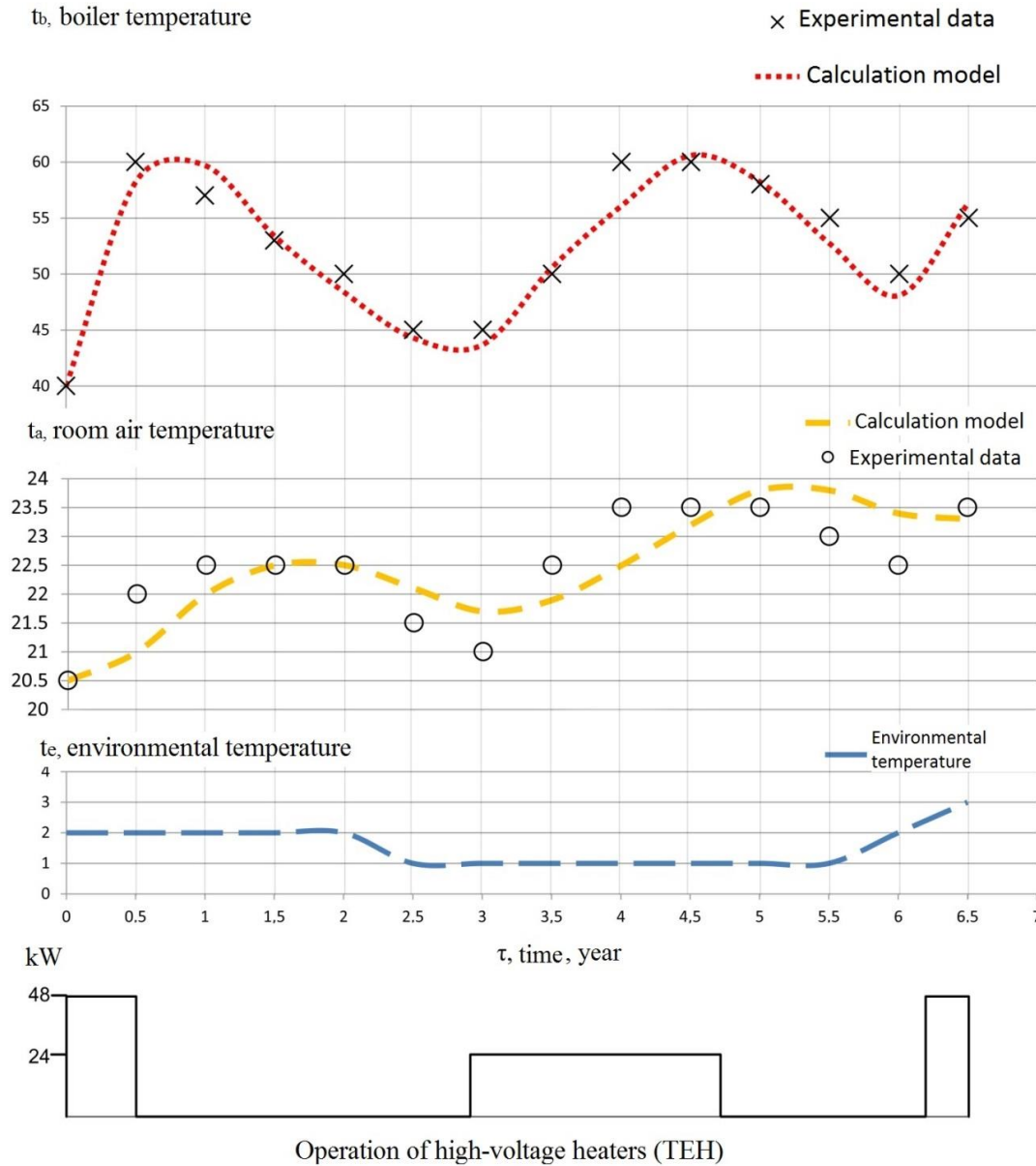


Fig. 1. Experimental temperature graphs and calculation model

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Белименко, С. С. Разработка критериев эффективности заряда и разряда твердотельного теплового аккумулятора / С. С. Белименко, В. А. Ищенко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 7–16. doi: 10.15802/stp/2014/29945.
2. Емельянов, А. Л. Обобщенная математическая модель нестационарного теплового режима пассажирского вагона с СКВ [Electronic resource] / А. Л. Емельянов, С. Е. Буравой, Е. С. Платунов // Науч. журнал НИУ ИТМО. Серия: «Холодильная техника и кондиционирование». – 2007. – № 1. – Available at: <http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/file/article/7695.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 03.01.2018.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Емельянов, А. Л. Энергоэффективные транспортные системы кондиционирования воздуха : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.03 / Емельянов Анатолий Леонович ; Санкт-Петербург. нац. исслед. ун-т информ. технологий механики и оптики. – Санкт-Петербург, 2016. – 384 с.
4. Жариков, В. А. Климатические системы пассажирских вагонов / В. А. Жариков. – Москва : Трансинфо, 2006. – 135 с.
5. Жариков, В. А. Методика определения расхода энергии на отопление пассажирских вагонов / В. А. Жариков, Б. Н. Китаев, Л. В. Разаренова. – Москва : Транспорт, 1994. – 23 с.
6. Китаев, Б. Н. Повышение эффективности теплообменных процессов в пассажирских вагонах / Б. Н. Китаев, В. А. Жариков. – Москва : Транспорт, 1995. – 53 с.
7. Китаев, Б. Н. Теплообменные процессы при эксплуатации вагонов / Б. Н. Китаев. – Москва : Транспорт, 1984. – 184 с.
8. Кондиционирование воздуха в пассажирских вагонах и на локомотивах / М. Г. Маханько, Ю. П. Сидоров [и др.]. – Москва : Транспорт, 1981. – 254 с.
9. Моделирование монополярных услуг / А. В. Пуговкин, А. Ю. Антонова, И. А. Заречная [и др.] // Докл. Томс. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 2 (20). – С. 80–86.
10. Сидоров, Ю. П. Основы кондиционирования воздуха на предприятиях железнодорожного транспорта и в подвижном составе / Ю. П. Сидоров. – Москва : Транспорт, 1978. – 199 с.
11. Системы вентиляции и установки кондиционирования воздуха. Вагоны / под ред. Л. Д. Кузьмина. – Москва : Машиностроение, 1978. – 376 с.
12. Фаерштейн, Ю. О. Кондиционирование воздуха в пассажирских вагонах / Ю. О. Фаерштейн, Б. Н. Китаев. – Москва : Транспорт, 1984. – 272 с.
13. Хоменко, І. Ю. Удосконалення системи енергетичного та холодильного обладнання пасажирських вагонів при капітальних ремонтах : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Хоменко Ірина Юріївна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – 125 с.
14. Energy efficiency of railway vehicles / N. Vetterli, U.-P. Menti, F. Sidler, E. Thaler, G. Zweife // CISBAT 2015 : Intern. Sci. Conf. (9.09–11.09.2015). – Lausanne, Switzerland, 2015. – P. 955–960.
15. Khomenko, I. Yu. Mathematical modeling of unsteady heat exchange in a passenger car / I. Yu. Khomenko // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 6 (48). – С. 147–155. doi: 10.15802/stp/2013/19762.
16. Kim, J. H. Design optimization for overhead ventilation duct system for a train using computational fluid dynamics and design of experiment / J. H. Kim, J. H. Rho // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 231. – Iss. 5. – P. 914–929. doi: 10.1177/0954408916646403.
17. Sweeney, E. Modification of Luas heating and ventilation systems to reduce energy consumption [Electronic resource] / E. Sweeney, J. Brunton // Irish Transport Research Network Conference : Conf. paper (5–6th Sept.) / Dublin Institute of Technology. – Dublin, Ireland, 2013. – Available at: <http://arrow.dit.ie/engschmecon/>. – Title from the screen. – Accessed : 03.01.2018.

Е. В. БІЛОШИЦЬКИЙ^{1*}

^{1*} «Проектно-конструкторське технологічне бюро», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, ел. пошта e.beloshickiy@gmail.com, ORCID 0000-0002-2424-8479

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА З СИСТЕМОЮ ОПАЛЕННЯ

Мета. Існуючі математичні моделі нестационарних теплових процесів у пасажирському вагоні не в повній мірі відображають процеси, що відбуваються при використанні системи опалення. Крім того, нестационарні теплові процеси найчастіше досліджувалися в стаціонарному режимі, коли потоки та параметри теплового контуру постійні та не залежать від часу. У зв'язку з появою більш ефективних технічних рішень системи життєзабезпечення виникла потреба й у створенні нового математичного апарату, який давав би змогу врахувати ці особливості та їх вплив на перебіг нестационарних теплових процесів протягом усього рейсу. Мета даної роботи – створення математичної моделі теплового режиму пасажирського вагона з системою опалення, що враховує нестационарність теплових процесів. **Методика.** Для реалізації поставленої

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

задачі методом моделювання була створена система диференціальних рівнянь, які описують нестационарні теплові процеси при опаленні пасажирського вагона; для розв'язання складеної системи рівнянь використувався метод елементарних балансів. **Результати.** Розроблено розрахунковий алгоритм та створено комп'ютерну програму для моделювання перехідних теплових процесів у пасажирському вагоні локомотивної тяги, що дозволяє враховувати різні конструктивні рішення системи життєзабезпечення пасажирських вагонів та здійснювати моделювання нестационарних теплових процесів на будь-якому етапі рейсу. **Наукова новизна.** Вперше розроблено математичну модель теплових процесів у вагоні з системою опалення, що дозволяє, на відміну від існуючих моделей, досліджувати нестационарність теплотехнічного стану в салоні вагона за різних умов експлуатації та порівнювати роботу різних систем життєзабезпечення з точки зору їх конструктивних рішень. **Практична значимість.** Розроблена математична модель нестационарного теплового режиму пасажирського вагона з системою опалення для оцінки ефективності нестационарних перехідних температурних станів у приміщеннях пасажирського вагону з урахуванням особливостей конструкції системи опалення та нормативних вимог. Це дозволяє здійснювати розробку й реалізацію оптимальних технічних характеристик приладів опалення та побудову алгоритму керування їх роботою відповідно до умов експлуатації, у тому числі з урахуванням теплової інерції вагону при перехідних режимах роботи системи опалення шляхом математичного моделювання.

Ключові слова: математичне моделювання; пасажирський вагон; нестационарні теплові процеси; система опалення

Э. В. БЕЛОШИЦКИЙ^{1*}

^{1*} «Проектно-конструкторское технологическое бюро», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 371 51 12, эл. почта e.beloshickiy@gmail.com, ORCID 0000-0002-2424-8479

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ С СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ

Цель. Существующие математические модели нестационарных тепловых процессов в пассажирском вагоне не в полной мере отражают процессы, протекающие при использовании системы отопления. Кроме того, нестационарные тепловые процессы чаще всего исследовались в стационарном режиме, когда потоки и параметры теплового контура постоянные, не зависящие от времени. В связи с появлением более эффективных технических решений системы жизнеобеспечения возникла необходимость в создании нового математического аппарата, который давал бы возможность учесть эти особенности и их влияние на ход нестационарных тепловых процессов в течение всего времени рейса. Цель данной работы – создание математической модели теплового режима пассажирского вагона с системой отопления, учитывающую нестационарность тепловых процессов. **Методика.** Для реализации поставленной задачи методом моделирования была создана система дифференциальных уравнений, которые описывают нестационарные тепловые процессы при отоплении пассажирского вагона; для решения составленной системы уравнений использовался метод элементарных балансов. **Результаты.** Разработан расчетный алгоритм и создана компьютерная программа для моделирования переходных тепловых процессов в пассажирском вагоне локомотивной тяги, позволяющая учитывать различные конструктивные решения системы жизнеобеспечения пассажирских вагонов и осуществлять моделирование нестационарных тепловых процессов на любом этапе рейса. **Научная новизна.** Впервые разработана математическая модель тепловых процессов в вагоне с системой отопления, позволяющая, в отличие от существующих моделей, исследовать нестационарность теплотехнического состояния в салоне вагона при различных условиях эксплуатации и сравнивать работу различных систем жизнеобеспечения с точки зрения их конструктивных решений. **Практическая значимость.** Разработана математическая модель нестационарного теплового режима пассажирского вагона с системой отопления для оценки эффективности нестационарных переходных температурных состояний в помещениях пассажирского вагона с учетом особенностей конструкции системы отопления и нормативных требований. Это позволяет осуществлять разработку и реализацию оптимальных технических характеристик приборов отопления и построения алгоритма управления их работой в соответствии с условиями эксплуатации, в том числе с учетом

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тепловой инерции вагона при переходных режимах работы системы отопления путем математического моделирования.

Ключевые слова: математическое моделирование; пассажирский вагон; нестационарные тепловые процессы; система отопления

REFERENCES

1. Belymenko, S. S., & Ishchenko, V. O. (2014). Development of criteria of charge and discharge efficiency of solid state of heat accumulator. *Science and Transport Progress*, 5(53), 7-16. doi: 10.15802/stp/2014/29945. (in Russian)
2. Yemelyanov, A. L., Buravoy, S. Y., & Platunov, Y. S. (2007). Obobshchennaya matematicheskaya model nestatsionarnogo teplovogo rezhima passazhirskogo vagona s SKV. *Scientific journal of NRU ITMO. Series: Refrigeration and Air Conditioning, 1*. Retrieved from : <http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/file/article/7695.pdf>. (in Russian)
3. Yemelyanov, A. L. (2016). *Energoeffektivnye transportnye sistemy konditsionirovaniya vozdukhа*. (Dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk). Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg. (in Russian)
4. Zharikov, V. A. (2006). *Klimaticheskiye sistemy passazhirskikh vagonov*. Moscow: Transinfo. (in Russian)
5. Zharikov, V. A., Kitaev, B. N., & Razarenova, L. V. (1994). *Metodika opredeleniya rashkoda energii na otoplenie passazhirskikh vagonov*. Moscow: Transport. (in Russian)
6. Kitaev, B. N., & Zharikov, V. A. (1995). *Povysheniye effektivnosti teploobmennyykh protsessov ekspluatatsii vagonov v passazhirskikh vagonakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
7. Kitaev, B. N. (1984). *Teploobmennyye protsessy pri ekspluatatsii vagonov*. Moscow: Transport. (in Russian)
8. Makhanko, M. G., Sidorov, Y. P., Khenach, A. K., & Shmidt, M. (1981). *Konditsionirovanie vozdukhа v passazhirskikh vagonakh i na lokomotivakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
9. Pugovkin, A. V., Antonova, A. Y., Zarechnaya, I. A., Matylitskaya, Y. S., Muslimova, N. I., & Nepomnyashchikh, Y. V. (2009). Modelirovanie monopolnykh uslug. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2(20), 80-86. (in Russian)
10. Sidorov, Y. P. (1978). *Osnovy konditsionirovaniya vozdukhа na predpriyatiyakh zheleznodorozhnogo transporta i v podvizhnom sostave*. Moscow: Transport. (in Russian)
11. Kuzmin, L. D. (Ed). (1978). *Sistemy ventilyatsii i ustanovki konditsionirovaniya vozdukhа. Vagony*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
12. Faershteyn, Y. O., & Kitaev, B. N. *Konditsionirovanie vozdukhа v passazhirskikh vagonakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
13. Khomenko, I. Y. (2014). *Udoskonalennia systemy enerhetychnoho ta kholodylnoho obladnannia pasazhyrskykh vahoniv pry kapitalnykh remontakh*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro. (in Ukrainian)
14. Vetterli, N., Menti, U.-P., Sidler, F., Thaler, E., & Zweife, G. (2015). Energy efficiency of railway vehicles. In *Proceedings of the International Scientific Conference CISBAT 2015, September 9-11, 2015, Lausanne*. 955-960. (in English)
15. Khomenko, I. Y. (2013). Mathematical modeling of unsteady heat exchange in a passenger car. *Science and Transport Progress*, 6(48), 147-155. doi: 10.15802/stp2013/19762. (in English)
16. Kim, J. H., & Rho, J. H. (2017). Design optimization for overhead ventilation duct system for a train using computational fluid dynamics and design of experiment. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part e-journal of process mechanical engineering*, 231(5), 914-929. doi: 10.1177/0954408916646403. (in English)
17. Sweeney, E., & Brunton, J. (2013) Modification of Luas heating and ventilation systems to reduce energy consumption. In *Irish Transport Research Network Conference: Conf. paper (5-6th Sept.)*. Dublin: Dublin Institute of Technoogy. Retrieved from <http://arrow.dit.ie/engschmecon/>. (in English)

Prof. V. L. Horobets, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. V. O. Habrynets, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published

Received: Oct. 31, 2017

Accessed: Jan. 05, 2017

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463-027.45

Л. О. НЕДУЖА^{1*}, А. О. ШВЕЦЬ^{2*}

^{1*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, ел. пошта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

^{2*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський 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

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ЯКОСТЕЙ ХРЕБТОВОЇ БАЛКИ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА

Мета. Головною метою даної роботи є аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень міцнісних якостей рухомого складу; пошук засобів проектування, моделювання, вибору, обґрунтування продовження терміну служби вантажних вагонів та їх елементів. **Методика.** В роботі застосовано метод скінченних елементів (МСЕ), який дозволяє практично повністю автоматизувати розрахунок механічних систем, проте, як правило, вимагає виконання значно більшого числа обчислювальних операцій у порівнянні з класичними методами механіки. Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки відкриває широкі можливості для впровадження МСЕ в інженерну практику. МСЕ реалізовано в багатьох відомих й широко розповсюджених програмних продуктах, що забезпечують міцнісний розрахунок моделей машин, механізмів, конструкцій, у тому числі рухомого складу залізниць. **Результати.** У статті представлено аналіз проведених теоретичних та експериментальних досліджень міцнісних якостей елементів рухомого складу на прикладі хребтової балки вантажних вагонів; розрахунки виконано з використанням сучасного пакету прикладних програм. Представлений приклад використання запропонованого підходу засвідчив його працездатність та ефективність, а також правильність спрямування відповідних науково-дослідних робіт. Запропонований підхід може бути використаний при вирішенні подібних оптимізаційних задач у науково-дослідній та дослідно-конструкторській практиці транспортного машинобудування. **Наукова новизна.** Авторами запропонований метод визначення показників надійності та розв'язання науково-прикладної проблеми розрахунку елементів вантажних вагонів із урахуванням особливостей експлуатації та впливу режиму навантаження, що дає можливість визначати їх довговічність ще на стадії проектування. Розроблено та досліджено модель хребтової балки вантажного вагона, на основі якої отримані залежності, що характеризують напружено-деформований стан її елементів. Були отримані науково-обґрунтовані результати з оцінки міцнісних якостей хребтових балок вантажних вагонів залежно від їх конструктивного виконання. Розглянуті аспекти, пов'язані з сучасним станом й перспективами розвитку залізничного транспорту, використанням програмного комплексу при проектуванні та розрахунках рухомого складу в залізничній галузі. **Практична значимість.** Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей елементів рухомого складу розглянуто на прикладі хребтової балки вантажного вагону; розрахунки виконано з використанням сучасного пакету програм. Застосування отриманих результатів сприяє підвищенню безпеки руху вантажних вагонів та дозволить покращити техніко-економічні показники роботи залізничного транспорту.

Ключові слова: метод скінченних елементів; міцність елементів рухомого складу; напруження в хребтій балці вагона; рухомий склад; хребтова балка вантажного вагона

Вступ

Транспорт – одна з важливіших галузей національної економіки, ефективна робота якої є необхідною умовою стабілізації, структурних перетворень, розвитку зовнішньоекономічної діяльності, захисту економічних інтересів України; це ланка господарства будь-якої держави, яка формує інфраструктуру та забезпечує

взаємозв'язок всіх її елементів, забезпечує функціонування світового господарства і потреб населення в усіх видах перевезень. В умовах складних світових економічних процесів ефективна державна транспортна політика України повинна враховувати геополітичні аспекти, особливості галузі в цілому, її роль у процесах економічних й соціальних перетво-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

рень для розвитку галузі, забезпечення її конкурентоспроможності [7, 10, 20, 23].

У відповідності до Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 роки, Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 р., Державної програми «Український вагон» одним із пріоритетних напрямків розвитку залізничної галузі є оновлення вантажного вагонного парку Укрзалізниці конкурентоспроможними моделями вагонів вітчизняного виробництва шляхом удосконалення базових конструкцій за найважливішими технічними, економічними, інтегральними критеріями, які відповідають сучасному рівню техніко-економічних показників (ТЕП). Одним із найважливіших ТЕП є матеріалоємність (тара) вагонів, зниження якої є одним із пріоритетних напрямків удосконалення їх конструкції [7, 15–17].

Загальновідомими шляхами зниження тари вагонів є здійснення заходів, що забезпечують зменшення зусиль, які діють на вагон, і його складових; розробка оптимальних конструктивних форм; раціональний вибір матеріалів; удосконалення технології виготовлення, технічно-обслуговування і ремонту вагонів.

Технічний рівень рухомого складу залізничного транспорту безпосередньо впливає на економічні показники транспортної галузі та економіки країни в цілому. Тому посилення потужностей залізничної галузі України є стратегічним напрямком розвитку її економіки. Ключову роль у підвищенні конкурентоспроможності та ефективності залізничного транспорту відіграє рівень техніко-економічних показників рухомого складу, найбільша частка якого припадає на вантажні вагони. Пріоритетним напрямком поліпшення ТЕП вантажних вагонів є удосконалення їх конструкцій за рахунок створення інноваційних конструкцій або модернізації окремих складових. При цьому вдосконалення складових передбачає використання у якості їх елементів нових профілів, які характеризуються меншою матеріалоємністю та собівартістю виготовлення при забезпеченні необхідних умов міцності [15–17].

Актуальність статті обумовлена однією з основних задач Концепції розвитку транспортно-шляхової інфраструктури України – визначенням перспектив її розвитку до 2020 р. Оскі-

льки транспортна система України є однією з важливих складових соціально-економічної системи держави, що забезпечує потреби виробництва й населення, цілісність економічного простору України, вона грає важливу роль у розвитку інтеграційних процесів, створення позитивного іміджу країни.

У зв'язку з цим надалі більшою насиченістю ринку вантажним рухомим складом у майбутньому, успіхом на ринку залізничних перевезень будуть користуватися тільки ті вантажні вагони, які мають поліпшені технічні характеристики, що забезпечать виконання головної вимоги – надійності [19]. Її підвищення дозволяє значно зменшити кількість позапланових відчіпних ремонтів і, отже, збільшує економічну ефективність вантажного рухомого складу, який експлуатується.

Підвищення якості створюваного механічного устаткування й конструкцій необхідно пов'язувати, насамперед, зі зменшенням їх ваги і вартості, збільшенням надійності та покращенням низки інших характеристик. Наразі актуальною є проблема поєднання в процесі проектування двох взаємовиключних тенденцій: економії матеріалу, з одного боку, і забезпечення необхідних характеристик міцності конструкцій – з іншого. Все це можна забезпечити за рахунок використання комп'ютерних технологій [6, 15–17].

Мета

Серед основних напрямків діяльності залізничної галузі є: розвиток швидкісного руху поїздів; підвищення рівня безпеки руху; розробка нового рухомого складу і модернізація існуючого парку. Це підтверджує, що транспортна галузь повинна рухатися в напрямку інноваційних змін, підвищувати своє значення як важливої транзитної підсистеми на шляху оновлення не тільки інфраструктури, а й стратегії усіх складових перевізного процесу, в тому числі й при роботі у взаємозв'язку з іншими видами транспорту [9, 15–17].

Функціональна залежність продуктивності вагона пов'язана з його динамічним навантаженням і середньодобовим пробігом, а підвищення динамічного навантаження вантажного вагона зменшить витрати залізниці. Як відомо з попередніх досліджень [9, 20–23], вивчення

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

динаміки вантажних вагонів – це складна теоретична задача щодо визначення допустимих та безпечних, із точки зору взаємодії колеса і рейки, швидкостей руху.

Метою даної роботи є аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень міцнісних якостей рухомого складу; пошук засобів проектування, моделювання, вибору, обґрунтування продовження терміну служби вантажних вагонів та їх елементів.

Методика

Міцність та ресурс основних несучих елементів рухомого складу залізниць є фундаментальними властивостями, які визначають їх подальшу успішну експлуатацію протягом тривалого періоду часу. Оцінка цих показників тісно пов'язана із забезпеченням вимог безпеки руху на залізничному транспорті, тому проблема наукового обґрунтування оцінок характеристик динаміки, міцності і ресурсу несучих конструкцій є важливою та актуальною як для нового рухомого складу, так й при проведенні робіт із продовження термінів служби рухомого складу, який виробив гарантований заводом-виробником термін [6].

Для обґрунтованого вирішення зазначеної проблеми виконуються комплексні фундаментальні, експериментальні, теоретичні та організаційні роботи, які можуть включати в себе:

- оцінку поточного технічного стану несучих конструкцій екіпажної частини рухомого складу (при проведенні робіт із оцінки його залишкового ресурсу);
- аналітичний розрахунок характеристик міцності елементів екіпажної частини з використанням додаткових моделей методом кінцевих елементів із метою виявлення найбільш навантажених зон несучих конструкцій, а також допустимих рівнів корозійної дії;
- прогноз динамічних якостей екіпажу методами математичного моделювання;
- оцінку ресурсу (повного або залишкового) з максимально можливим використанням даних натурних випробувань;
- оцінку «живучості» конструкції на підставі теоретичних досліджень та відповідних випробувань.

При виконанні інженерних розрахунків, пов'язаних із аналізом міцності машин, механізмів,

конструкцій на практиці використовують як аналітичні, так і чисельні методи. Використання сучасних комп'ютерних комплексів дозволяє не лише відтворювати дані й відомості тим чи іншим способом, а також надає можливість ефективно та безпосередньо взаємодіяти з інформаційним об'єктом, що створюється або демонструється. Програмні комплекси різного призначення вміло застосовують сучасні комп'ютерні технології на всіх етапах проектування, розробки, експлуатації, для визначення остаточного ресурсу, а саме: на етапі попереднього дослідження, вибору принципів дії, розробок ескізного та технічного проєктів, їх оптимізації, підготовки конструкторської документації та керуючої інформації для автоматизованих виробництв, всебічного інженерного аналізу тощо [10, 20–23].

У зв'язку з активним впровадженням в інженерну практику обчислювальної техніки найбільш ефективним наближеним методом вирішення такого класу прикладних задач механіки є метод скінчених елементів (МСЕ), як основний метод, що лежить в основі переважної більшості сучасних програмних комплексів, призначених для виконання інженерних задач у різноманітних галузях [6, 10]. Ключова ідея МСЕ (наприклад, вагон-хопер) полягає в наступному: модель конструкції замінюється на дискретну шляхом розбиття її на кінцеві елементи (КЕ) (рис. 1). Розташовані певним чином (залежно від конструкції об'єкта) та закріплені відповідно до граничних умов, кінцеві елементи дозволяють адекватно описати все різноманіття моделей [10, 14].

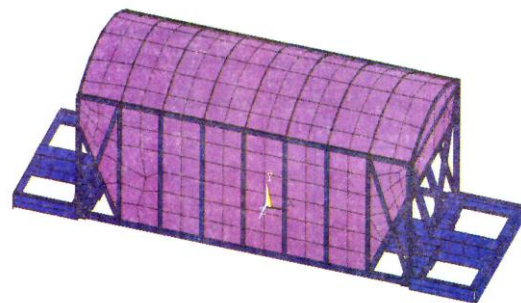


Рис. 1. Кінцево-елементна модель кузова та рами вагона-хопера

Fig. 1. Finite element model of a body and a frame in a car-hopper

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

До кінцевого елемента можуть бути прикладені (рис. 2) зовнішні навантаження (зосереджені та розподілені сили й моменти), які при-

водяться до вузлів даного елемента і носять назву вузлових навантажень [10, 14].

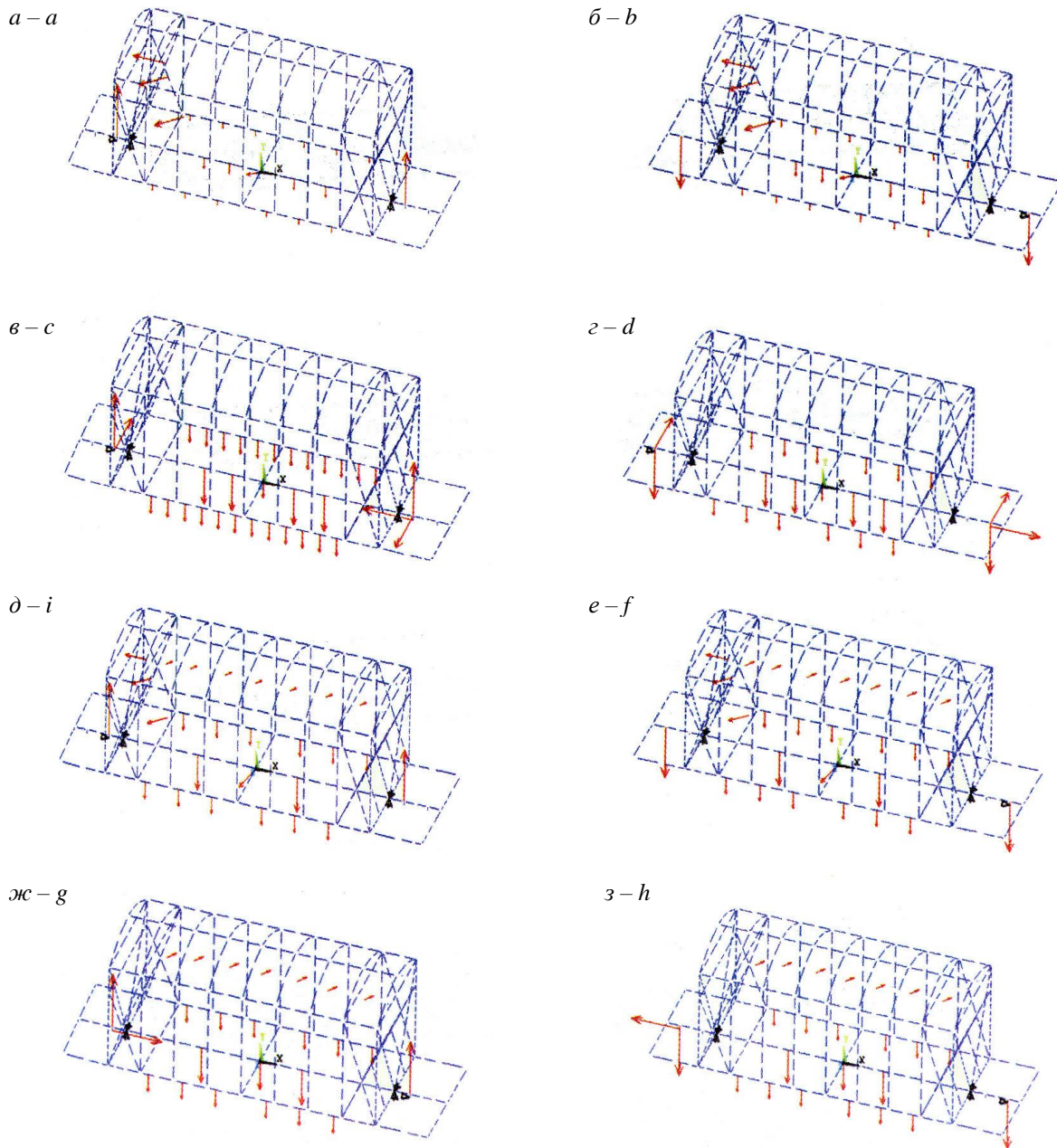


Рис. 2. Схеми прикладання навантажень на елементи кузова і рами вагона-хопера при I-у розрахунковому режимі:

a – удар; *b* – ривок; *c* – стискання; *d* – розтягання;

III-у розрахунковий режим:

e – удар; *f* – ривок; *g* – стискання; *h* – розтягання

Fig. 2. Schemes of loads application to the elements of a body and a frame of a car-hopper: I calculated mode:

a – impact; *b* – a jerk; *c* – compression; *d* – stretching;

III calculated regime: *e* – impact; *f* – jerk; *g* – compression; *h* – stretching

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У процесі розрахунку будь-якої конструкції завжди можна виділити етапи, серед яких:

- ідеалізація, яка полягає у переході до розрахункової схеми;
- аналіз – власне розрахунок ідеалізованої розрахункової схеми;
- інтерпретація – перенесення результатів розрахунку до вихідної схеми, висновки щодо реальної конструкції.

Метод кінцевих елементів дозволяє практично повністю автоматизувати розрахунок механічних систем, хоча, як правило, вимагає виконання значно більшого числа обчислювальних операцій у порівнянні з класичними методами механіки. Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки відкриває широкі можливості для впровадження МСЕ в інженерну практику [10].

МСЕ реалізовано в багатьох відомих й широко розповсюджених програмних продуктах, що забезпечують розрахунок міцності моделей машин, механізмів, конструкцій, у тому числі рухомого складу залізниць.

Дана методика ґрунтується на Постанові Кабінету Міністрів України від 30 грудня 2015 р. № 1194, яка затверджує «Технічний регламент безпеки рухомого складу залізничного транспорту», з визначенням основних вимог до рухомого складу, що виготовляється та модернізується, а також до його складових і запасних частин під час проектування, виробництва, мо-

нтажу, налагодження, введення в експлуатацію, експлуатацію, ремонту.

Конструкційні рішення рухомого складу залізничного транспорту повинні забезпечувати його безпеку протягом установленого виробником строку експлуатації та/або гарантійного строку використання та/або строку зберігання, витримувати впливи, які мають місце в процесі його експлуатації.

Наприклад, рама вагона є основою кузова, яка сприймає від нього та вантажу, що перевозиться, усе навантаження, передає його на ходові частини і, крім того, служить для розміщення автогальмового обладнання й автозчепних пристроїв [6]. Рами сучасних вантажних вагонів представляють собою міцні металеві суцільнозварні конструкції з повздовжніх і поперечних балок.

Хребтова балка (рис. 3) є одним із найбільш відповідальних несучих вузлів рами вагона, служить для кріплення на ній автозчепного й гальмівного обладнання; за допомогою автозчепного пристрою вона передає повздовжні сили на інші вагони. Оскільки хребтова балка жорстко зв'язана також із іншими елементами кузова, то поряд із повздовжніми вона сприймає й вертикальні сили. Таким чином, хребтова балка повинна мати достатню міцність та жорсткість, бути простою по конструкції, надійною в експлуатації, доступною для технічного огляду [6]. Її виготовляють із потужних Z-подібних, швелерних та двотаврових прокатних профілів.

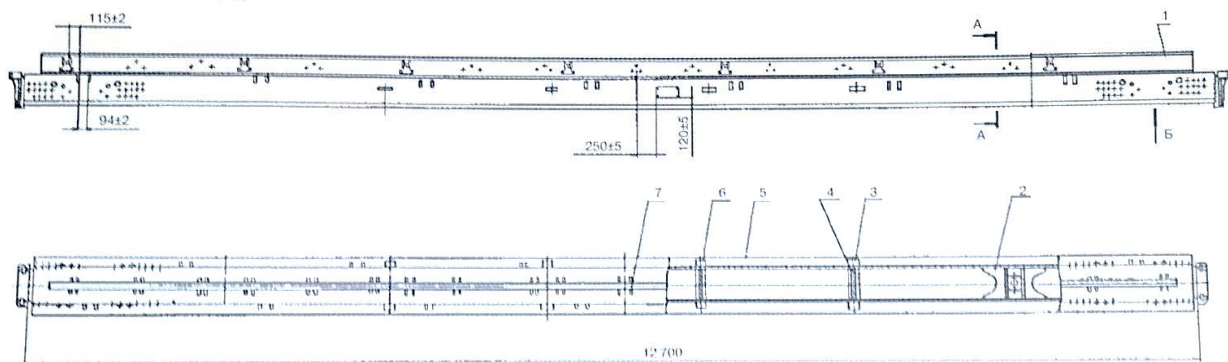


Рис. 3. Хребтова балка:

- 1 – верхня балка; 2 – надп'ятник; 3, 6 – нижні листи; 4 – діафрагма; 5 – балка; 7 – вушко;
8 – упор задній; 9, 10 – заклепки; 11 – планка; 12 – упор передній

Fig. 3. Spine beam:

- 1 – upper beam; 2 – anthrax; 3, 6 – lower plates; 4 – diaphragm; 5 – beam; 7 – ear;
8 – stop back; 9, 10 – rivets; 11 – strap; 12 – stop front

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Шкворневі балки передають через п'ятник та ковзуни на візки всі виникаючі в процесі руху статичні й динамічні зусилля. Вони представляють собою конструкцію коробчастого перетину змінної висоти по довжині та утворені двома вертикальними й нижнім листами. У перетині з хребтовою шкворневі балки посилені надп'ятниковою коробкою [6].

Результати

Динамічні ударні випробування вантажних вагонів, при яких поздовжні ударні сили прикладаються до рами вагона через автозчеплення, проводять із метою визначення динамічних напружень та їх розподілу в елементах рами і кузова вагона до граничної допустимої величини поздовжньої сили, при якій може відбутися руйнування рами або кузова вагона.

Метою випробувань на статичну міцність є оцінка показників міцності та несучої здатності конструкції вагона. Згідно з [4, 11, 19], оцінка міцності конструкції дослідного зразка вагона при міцнісних статичних випробуваннях проводиться шляхом порівняння величин сумарних напружень від поєднання розрахункових експлуатаційних навантажень по I, III і ремонтним розрахунковим режимам із величинами допустимих напружень:

I режим – трогання з місця, осаджування або екстрене гальмування при малих швидкостях руху, зіткнення вагонів при маневрових роботах;

III режим – рух поїзда з найбільшою допустимою швидкістю;

ремонтний режим – піднімання завантаженого і порожнього вагону домкратами, встановленими у відповідних точках.

Для прикладу представлені деякі результати випробувань на міцність хребтової балки різних видів рухомого складу:

– для вагонів моделі 13-1839, 13-9990-01 і 11-9962 представлені в табл. 1 та на рис. 4, а (результати статичних випробувань на міцність вагонів від дії вертикального навантаження, бічної сили, навантаження від різниці висот автозчеплень, бічних сил взаємодії між вагонами по кривих, поздовжніх розтягуючих та стискаючих навантажень при I і III розрахункових режимах) [3, 5, 19].

Наступним етапом відпрацювання конструкції вагона, оцінки його динамічних та міцніс-

них якостей з метою введення в експлуатацію є динамічні поїзні (ходові) випробування [2, 4, 11]. За результатами приймальних випробувань встановлюються придатність вагона до експлуатації. Зокрема, встановлюється допустима швидкість руху вагона, при якій забезпечується безпека руху, необхідна міцність, стійкість й плавність ходу вагона (в основному для пасажирських вагонів) на прямих та кривих ділянках сучасної типової конструкції верхньої будови колії, що задовольняє встановленим нормам поточного утримання.

Таблиця 1

Максимальні еквівалентні напруження в хребтовій балці

Table 1

Maximum equivalent stresses in the spine beam			
Експериментальні напруження, МПа	Моделі вантажних вагонів		
	13-1839	13-9990-01	11-9962
$\sigma_{екв}$ I розт	122	145	106
$\sigma_{екв}$ I ст	96	65	325
$\sigma_{екв}$ III розт	147	175	97
$\sigma_{екв}$ III ст	61	148	135
$\sigma_{екв}$ ремонт	30	132	166

Динамічні міцнісні випробування вагонів виконуються відповідно до [4]. Реєстрація вимірюваних даних процесів при ходових випробуваннях проводиться на прямих, кривих ділянках колії та на стрілочних переводах, у всьому діапазоні допустимих експлуатаційних швидкостей, починаючи зі швидкості 25 км/год до конструкційної швидкості 120 км/год в завантаженому режимі вагонів.

На рис. 4 представлені графіки залежності динамічних напружень в основних несучих вузлах:

– вагона-цистерни моделі 15-1900 та піввагона моделі 12-1905 (рис. 4, б) [2];

– вагона-платформи моделі 13-9975 на різних ділянках залізничної колії (рис. 4, в, г) [18].

З урахуванням проведеного обстеження технічного стану в результаті розрахунків були отримані напруження при I й III розрахункових режимах:

– для вагонів моделі 11-715 та 12-515 (табл. 2 та рис. 4, д, е) [13, 14].

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

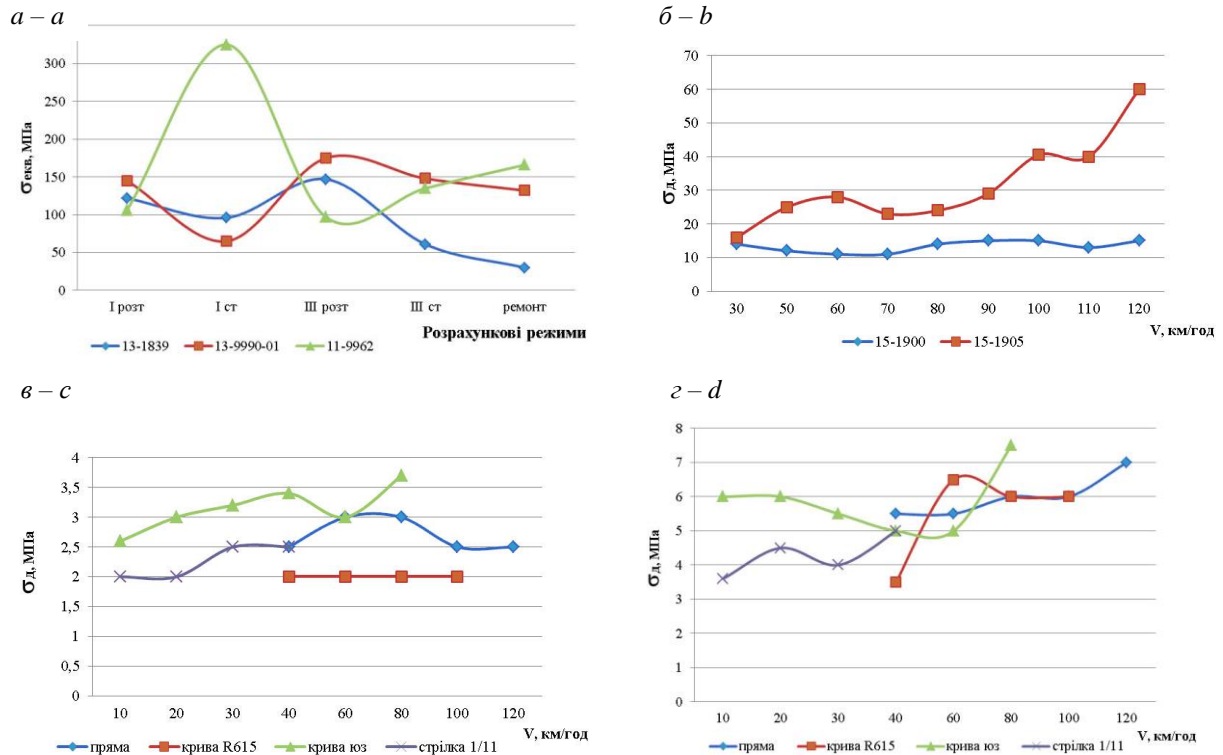


Рис. 4. Напруження в хребтовій балці:

- a* – максимальні еквівалентні напруження в хребтовій балці вагонів моделі 13-1839, 13-9990-01 і 11-9962;
b – динамічні напруження в хребтових балках від швидкості руху вагона-цистерни моделі 15-1900 і піввагона моделі 15-1905;
c – динамічні напруження в хребтовій балці вагона-платформи моделі 13-9975 (порожній режим);
d – динамічні напруження в хребтовій балці вагона-платформи моделі 13-9975 (завантажений режим)

Fig. 4. Stresses in the spine beam:

- a* – maximum equivalent stresses in the spine beam of the model cars 13-1839, 13-9990-01 and 11-9962;
b – dynamic stresses in the spine beams on the speed of the tank-car of the model 15-1900 and the gondola car, model 15-1905;
c – dynamic stresses in the spine beam of the car-platform, model 13-9975 (empty mode);
d – dynamic stresses in the spine beam of the car-platform, model 13-9975 (loaded mode)

Таблиця 2

Максимальні напруження в хребтовій балці

Table 2

Maximum stresses in the spine beam

Місце прикладення напруження	Моделі вагонів	Максимальні напруження, МПа							
		I режим				III режим			
		удар	ривок	стискання	розтяг	удар	ривок	стискання	розтяг
У середній частині	11–715	152	108	131	115	76	74	82	57
У зоні шкворневої балки	11–715	294	215	257	203	102	84	86	71
	12–515	282	250	237	200	160	101	84	75
У консольній частині	11–715	97	82	185	176	35	15	12	72
	12–515	270	242	253	223	150	91	120	103

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для з'ясування алгоритму використання теоретичного матеріалу та отримання практичних навичок наведемо приклад розрахунку на міц-

ність хребтової балки вагона-платформи моделі 13-7024 (рис. 5, а) [6, 10, 12].

а – а



б – б

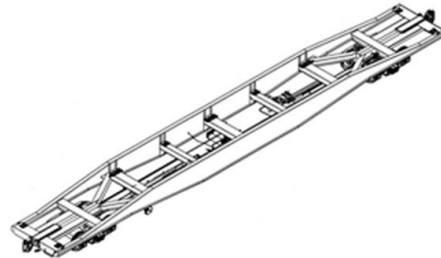


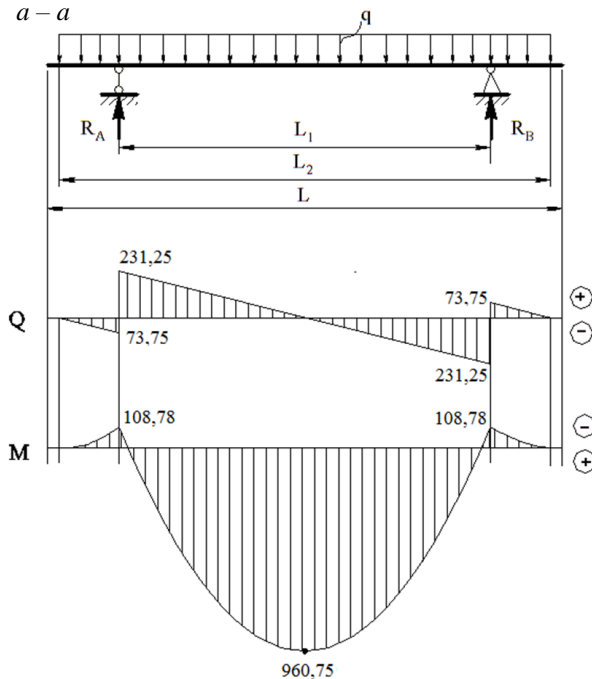
Рис. 5. Вагон-платформа моделі 13-7024: а – загальний вигляд; б – розрахункова схема

Fig. 5. Car-platform, model 13-7024: а – general view; б – the calculation scheme

Для цього хребтова балка була розглянута як статично визначувана балка (рис. 5, а), оперта на шарнірних опорах, з розмірами $L_1 = 18,5 \text{ м}$, $L_2 = 24,4 \text{ м}$, $L = 25,62 \text{ м}$, з поперечним перерізом – з двотавру № 33 (рис. 5, б), з геометричними параметрами: $t = 11,2 \text{ мм}$,

$h = 330 \text{ мм}$, $b = 140 \text{ мм}$, $d = 7 \text{ мм}$, $I_z = 9840 \text{ см}^4$; на балку діє рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю $q = 25 \text{ кН/м}$.

а – а



б – б

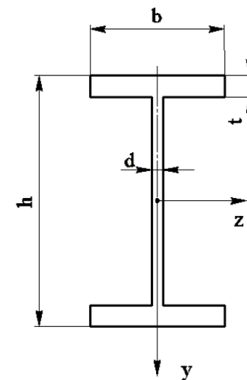


Рис. 6. Загальний вигляд:
а – епюра розподілу внутрішніх зусиль Q та M по довжині хребтової балки;
б – поперечний переріз хребтової балки

Fig. 6. General view:
а – an epure of the distribution of internal forces Q and M along the length of the spine beam;
б – cross section of the spine beam

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

З використанням основних методів теоретичної механіки та опору матеріалів [12] побудовано епюри поперечних сил та згинальних моментів (рис. 5, *a*). Для небезпечного перерізу обчислені нормальні та дотичні напруження в п'яти точках (рис. 7) та побудовані діаграми розподілу нормальних (рис. 7, *б*) та дотичних напружень (рис. 7, *в*) по висоті перерізу; вико-

нано розрахунок із перевірки на міцність для точки з'єднання полиці зі стінкою двотавра. Як видно з результатів розрахунків, отримані розрахункові значення напружень не перевищують допустимого значення для основних марок сталі хребтових балок [6], із яких виконують вагони рухомого складу (табл. 3).

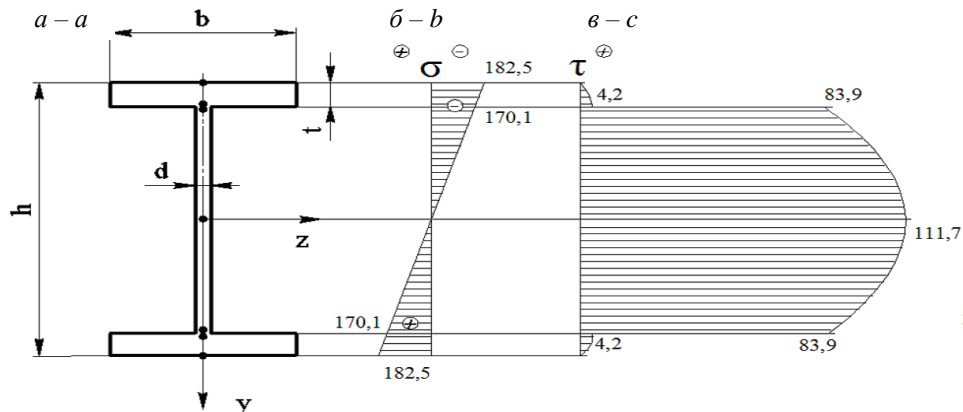


Рис. 7. Діаграми розподілу напружень по висоті двотавра:
a – поперечний переріз хребтової балки; *б* – епюра розподілу нормальних напружень;
в – епюра розподілу дотичних напружень

Fig. 7. Diagrams of stresses distribution along the height of two-taurus:
a – cross section of the spine beam; *б* – an epure of the normal stresses distribution;
в – an epure of the tangential stresses distribution

Таблиця 3

Границі витривалості для марок сталей хребтових балок

Table 3

Boundaries of endurance for steel grades of spine beams

Марка сталі	Границя міцності, МПа, (не менше)	Границя текучості, МПа, (не менше)	Обмежена границя витривалості при симетричному циклі, МПа (не менше)	
			нормальні σ_{-1No}	дотичні τ_{-1No}
Ст. 3 (20)	380	240	170	110
Ст. 5 (35)	500	280	220	140
ОсВ, ОсЛ	560 – 590	280	220	–
Ст. 6 (45)	600	310	250	160
09Г2 (09Г2Д)	460	310	200	130
09Г2ДТ, 10Г2С1	500	350	230	140
40Х (поліпшена)	1 000	800	380	230
45Г2	700	400	320	190

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Закінчення табл. 3

End of table 3

Марка сталі	Границя міцності, МПа, (не менше)	Границя текучості, МПа, (не менше)	Обмежена границя витривалості при симетричному циклі, МПа (не менше)	
			нормальні σ_{-1No}	дотичні τ_{-1No}
55C2 (поліпшена)	1 300	1 200	550	330
Лита сталь за ТЗ УВЗ № 61, ТЗ-1 й № 517 ТЗ-1	420	250	170	—
Вуглецева (фасонні випливи): 20Л 35Л	420	220	170	—
	500	280	200	—

Примітка: Границі витривалості відносяться до малих полірованих зразків при круговому згині й $N_0 = 10^7$ циклів

Перевірний розрахунок на міцність хребтової балки (рис. 8–9) виконано за допомогою

одного з сучасних програмних комплексів [10, 12].

a – a

b – b

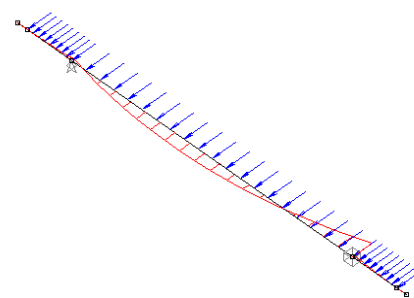
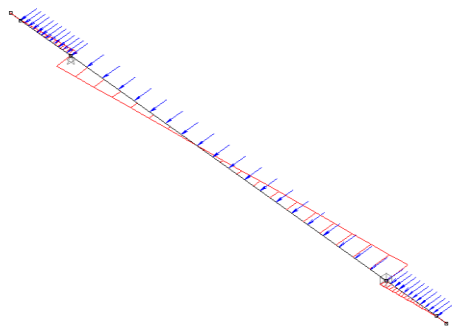


Рис. 8. Епюри:

a – поперечних сил Q; б – згинальних моментів M

Fig. 8. Epures:

a – transverse forces Q; b – bending moments M

a – a

b – b

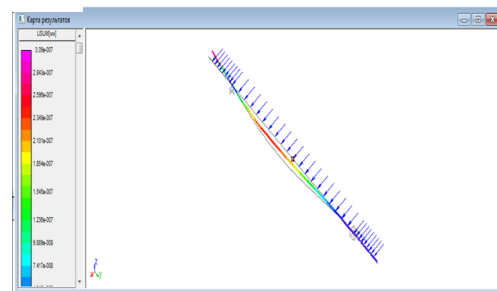
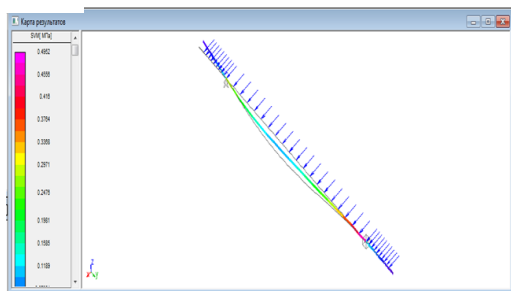


Рис. 9. Результати розрахунку: a – «Напруження»; б – «Переміщення»

Fig. 9. Results of calculation: a – «Stress»; b – «Moving»

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За результатами розрахунку також отримана діаграма напружено-деформованого стану хребтової балки платформи (рис. 10).

Рухомий склад, що має значний термін служби, вимагає додаткового контролю для забезпечення безпеки руху. У зв'язку з чим, вкрай важливо знати не тільки реальну картину на-

пружено-деформованого стану, на основі якого виконується оцінка ресурсу, а й фактичні фізико-механічні характеристики металу. Як змінилися основні механічні характеристики (границя міцності, твердість, границя витривалості, ударна в'язкість і т. п.) несучої конструкції після тривалої експлуатації [13].

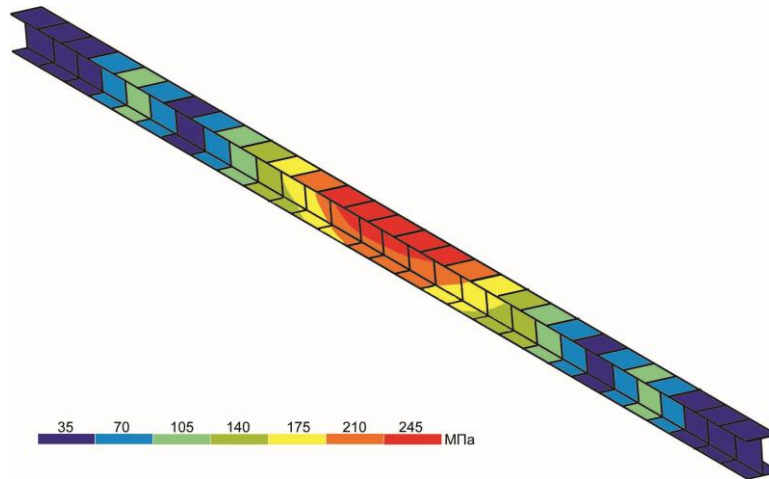


Рис. 10. Діаграма напружено-деформованого стану хребтової балки

Fig. 10. Diagram of the stress-strain state of the spine beam

Результати обстеження технічного стану вагонів після тривалої експлуатації показують, що більшість експлуатаційних ушкоджень пов'язані з порушеннями в експлуатації при навантаженні і вивантаженні вантажу. Більшою мірою це пошкодження розвантажувально-дозуючих пристроїв, обшивки кузова, бункерів і т. п. У той же час, виявлення істотних дефектів несучих конструкцій, таких як тріщини в хребтових та шкворневих балках, неприпустимі їх деформації та інші несправності, що не підлягають ремонту, мають досить малий відсоток.

За результатами виконаних розрахунків, з урахуванням інформації, отриманої при технічному обстеженні вагонів, а також рекомендацій [4] розробляється схема наклейки тензометричних датчиків для подальшого проведення контрольних випробувань вагонів. Відібраний зразок (вагон) з найгіршим технічним станом направляється для проведення контрольних випробувань, що визначають режими навантаження, які характерні для експлуатації: при зіткненні вагонів, скиданні з клинів (імітації поїзного режиму), при завантаженні/розвантаженні.

Результати розрахунків і проведених випробувань дають практично повну картину напру-

жено-деформованого стану конструкції вагона. У той же час, із огляду на його тривалу експлуатацію, необхідна інформація про фактичні значення фізико-механічних характеристик матеріалу, з якого виготовлена несуча конструкція, що визначає залишковий ресурс вагона. Хребтова балка піддається впливу навантаження, яке змінюється циклічно. Причому напруження досягають максимуму в області, прилеглій до границі між вертикальною стійкою профілю та його нижньою полицею. У процесі тривалої експлуатації це може призвести до зародження й акумуляції у даній області дефектів, що знижують механічні характеристики сталі.

Базуючись на отриманих результатах розрахунків і випробувань, встановлюються проблемні зони несучої конструкції, а також із урахуванням деформації сталі, розробляються схеми вирізки зразків металу для дослідження хімічного складу і фізико-механічних властивостей матеріалу несучої конструкції.

Деякі результати визначення механічних характеристик сталі 09Г2Д після тривалої експлуатації представлені в табл. 4 [13] та на рис. 11 [14].

Таблиця 4

Механічні характеристики сталі хребтової балки рами вагона

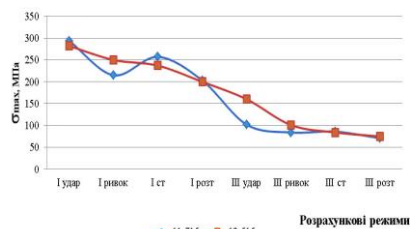
Table 4

Mechanical characteristics of steel in the spine beam of the car frame

Номер зразка	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
По ГОСТ 19281-89 клас міцності 345	Таблиця 1 ГОСТ 19281-89 – Сортовий і фасонний прокат			
	не < 345	не < 480	не < 21	–
Зразки, вирізані з верхньої полиці				
Середнє значення	355	478,85	24,7	74
Зразки, вирізані з вертикальної стойки				
Середнє значення	360	479,4	24,48	73

Для з'ясування алгоритму використання теоретичного матеріалу та отримання практичних навичок наведемо приклад розрахунку на міцність хребтової балки вагона-платформи моделі 13-7024 (рис. 5, а), [6, 10, 12].

а – а



б – б

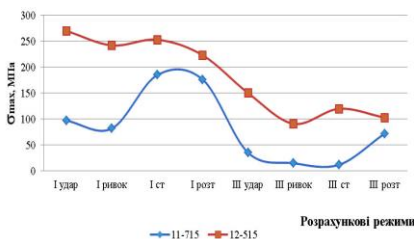


Рис. 11. Графіки залежності максимальних напружень в хребтій балці вагонів моделі 11-715 і 12-515:

а – у зоні шкворневої балки; б – в консольній частині

Fig. 11. Dependency graphs of the maximum stresses in the spine beam of the cars, model 11-715 and 12-515:

а – in the area of the span bolster; б – in the console part

Як вже було зазначено у «Технічному регламенті», однією з основних частин технічного забезпечення безпеки руху є виробництво рухомого складу. Сучасним вимогам відповідає лінія для виготовлення хребтових балок ванта-

жних вагонів (рис. 12), що є універсальною, дозволяє повністю автоматизувати цей процес та випускати їх для трьох типів вагонів на одному і тому ж обладнанні [1].

а – а



б – б



Рис. 12. Робототехнічний комплекс для виготовлення хребтової балки:

а – для зварювання проміжних балок; б – для приварювання підсилюючого профілю до хребтової балки

Fig. 12. Robotic complex for manufacturing of the spine beam:

а – for welding the intermediate beams; б – for welding the reinforcing profile to the spine beam

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Установка автоматичного зварювання елементів хребтової балки є комплексом технологічного обладнання, що забезпечує їх збірку та подальше зварювання між собою в автоматичному режимі зі застосуванням електромеханічної системи стеження за зміною положення осі зварного з'єднання.

Наукова новизна та практична значимість

Безпека руху вантажних поїздів, значення допустимих швидкостей їх руху й вантажопідйомності, витрати на утримання рухомого складу і колійного господарства та збільшення міжремонтних пробігів вагонів суттєво залежать від конструкції вантажного рухомого складу залізниць. Важливим напрямком для покращення техніко-економічних параметрів рухомого складу є вдосконалення конструкцій хребтових балок для підвищення їх міцності, довговічності, осьового навантаження. Дослідження з використанням сучасних комплексів дозволяє зробити ще один крок у детальному моделюванні завантаженості елементів вантажних вагонів, зокрема хребтових балок, із урахуванням їх конструктивного виконання [9].

Наукова новизна отриманих результатів роботи полягає в наступному:

- запропоновано методи визначення показників надійності та розв'язання науково-прикладної проблеми розрахунку елементів вантажних вагонів із урахуванням особливостей експлуатації та впливу режиму навантаження, що дає можливість визначати їх довговічність і на стадії проектування;
- розроблено та досліджено модель хребтової балки вантажного вагону, на основі якої отримані залежності, які характеризують напружено-деформований стан елементів хребтової балки;

– отримано науково-обґрунтовані результати з оцінки міцнісних якостей хребтових балок вантажних вагонів залежно від їх конструктивного виконання.

Розглянуто аспекти, що пов'язані з сучасним станом та перспективами розвитку залізничного транспорту, використання програмного комплексу при проектуванні та розрахунках рухомого складу в залізничній галузі.

Практичну цінність теоретичних та експериментальних досліджень міцнісних якостей елементів рухомого складу розглянуто на прикладі хребтової балки вантажного вагону, розрахунки виконано з використанням сучасного пакету програм. Застосування отриманих результатів сприяє підвищенню безпеки руху вантажних вагонів і дозволить покращити техніко-економічні показники роботи залізничного транспорту.

Висновки

У статті представлено аналіз проведених теоретичних та експериментальних досліджень міцнісних якостей елементів рухомого складу на прикладі хребтової балки вантажних вагонів; розрахунки виконано з використанням сучасного пакету прикладних програм.

Представлений приклад використання запропонованого підходу засвідчив його працездатність та ефективність, а також правильність спрямування відповідних науково-дослідних робіт.

Запропонований підхід може бути використаний при вирішенні подібних оптимізаційних задач в науково-дослідній та дослідно-конструкторській практиці транспортного машинобудування.

Автори виражають подяку проф. С. В. Мямліну за допомогу при підготовці статті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизированные сварочные комплексы для сварки хребтовых балок грузовых вагонов [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.tvagonm.com.ua/upload/iblock/44/1/Pre8en1aИоп_5Yar_kompleksiJireb_balki.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 27.10.2017.
2. Бубнов, В. М. Улучшение прочностных характеристик грузовых вагонов на тележках модели 18-1711 / В. М. Бубнов, С. В. Мямлин, Н. Б. Манкевич // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 4 (193). – С. 32–34.
3. Бубнов, В. М. Экспериментальные исследования шарнирно-соединенного вагона-платформы для крупнотоннажных контейнеров модели 13-1839 / В. М. Бубнов, С. В. Мямлин, Н. Л. Гуржи // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 28. – С. 12–16.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества : РД 24.050.37-95. – Введ. 1995–02–02. – Москва : ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
5. Испытания вагона-платформы универсальной / В. И. Сенько, С. В. Макеев, А. Д. Чепурной, Р. И. Шейченко, А. В. Литвиненко, Р. В. Граборов, Н. А. Ткачук, М. А. Чубань // Вісн. Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків, 2016. – № 12 (1184). – С. 71–83. doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.10.
6. Конструирование и расчет вагонов : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. Н. Котуранов, А. А. Хохлов, П. С. Анисимов ; под общ. ред. В. В. Лукина. – Москва : УМК МПС России, 2000. – 728 с.
7. Кулієва, О. Плани і перспективи українських залізниць / О. Кулієва // Вагонний парк. – 2011. – № 1. – С. 8–10.
8. Методологические основы расширенных прочностных и динамических исследований при испытаниях длиннобазных платформ / В. И. Сенько, С. В. Макеев, А. Д. Чепурной, А. В. Литвиненко, Р. И. Шейченко, Р. В. Граборов, Н. А. Ткачук, М. А. Чубань // Механіка та машинобудування. – 2015. – № 1. – С. 67–81.
9. Мямлин, С. В. Научные методы оценки ресурса несущих конструкций подвижного состава / С. В. Мямлин, В. Л. Горобец // Вісн. сертифікації залізн. трансп. – 2011. – № 8. – С. 12–17.
10. Недужа, Л. О. Застосування програмного комплексу APM WinMachine при проектуванні та розрахунках у машинобудуванні / Л. О. Недужа, А. О. Швець // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 129–147. doi: 10.15802/stp2016/67328.
11. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГОСНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 352 с.
12. Опір матеріалів : методичні вказівки до виконання розрахунково-графічних робіт / О. М. Бондарев, С. А. Костиця, Л. В. Урсуляк, С. Ю. Молчанов. – Дніпро : ДНУЗТ ім. акад. В. А. Лазаряна, 2017. – Ч. I. – 58 с.
13. Путятю, А. В. Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции / А. В. Путятю, Е. Н. Коновалов, П. М. Афанаськов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1 (34). – С. 26–35.
14. Третьяков, А. В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации : монография / А. В. Третьяков. – Санкт-Петербург : ОМ-Пресс, 2004. – 348 с.
15. Фомін, О. В. Аналіз доцільності застосування шестигранних порожнистих профілів в якості складових елементів несучих систем напіввагонів / О. В. Фомін // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 6 (54). – С. 146–153. doi: 10.15802/stp2014/33403.
16. Фомін, О. В. Використання профілю з перерізом у вигляді прямокутної труби в якості елементів каркасів кузовів залізничних напіввагонів / О. В. Фомін, В. В. Фомін // Зб. наук. пр. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2012. – № 3 (174). – С. 244–250.
17. Фомін, О. В. Впровадження круглих труб в якості складових елементів рам вантажних вагонів / О. В. Фомін // Вісн. Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків, 2013. – № 38 (1011). – С. 33–38.
18. Ходовые прочностные и динамические испытания вагона-платформы / А. Д. Чепурной, А. В. Литвиненко, Р. И. Шейченко, Р. В. Грабов, М. А. Чубань // Вісн. Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Серія: Транспортне машинобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2015. – № 31 (1140). – С. 111–128.
19. Экспериментальные исследования грузового вагона / А. Д. Чепурной, А. В. Литвиненко, А. Н. Баранов, М. А. Бондаренко // Вісн. Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Серія: Транспортне машинобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2014. – № 14 (1057). – С. 1–18.
20. Determination of Dynamic Performance of Freight Cars Taking Into Account Technical Condition of Side Bearers / S. Myamlin, L. Neduzha, O. Ten, A. Shvets // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 1 (43). – С. 162–169. doi: 10.15802/stp2013/9589.
21. Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars / S. Myamlin, O. Lunys, L. Neduzha, O. Kyryl'chuk // Transport Means : Proc. of 21st Intern. Scientific Conf. (20–22nd Sept. 2017). – Kaunas, 2017. – P. 973–976.
22. Myamlin, S. Testing of Railway Vehicles Using Roller Rigs / S. Myamlin, J. Kalivoda, L. Neduzha // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 187. – P. 688–695. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.439.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

23. Spatial Vibration of Cargo Cars in Computer Modelling with the Account of Their Inertia Properties / S. Myamlin, L. Neduzha, O. Ten, A. Shvets // *Mechanika 2010 : Proc. of 15th Intern. Conf. (8, 9 Apr. 2010) / Kaunas University of Technology.* – Kaunas, 2010. – P. 325–328.

Л. А. НЕДУЖА^{1*}, А. А. ШВЕЦ^{2*}

^{1*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, эл. почта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

^{2*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ КАЧЕСТВ ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Цель. Главной целью данной работы является анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований прочностных качеств подвижного состава; поиск средств проектирования, моделирования, выбора, обоснования продления срока службы грузовых вагонов и их элементов. **Методика.** Работа основана на методе конечных элементов (МКЭ), позволяющему практически полностью автоматизировать расчет механических систем, хотя, как правило, требует выполнения значительно большего числа вычислительных операций по сравнению с классическими методами механики. Современный уровень развития вычислительной техники открывает широкие возможности для внедрения МКЭ в инженерную практику. МКЭ реализовано во многих известных и широко распространенных программных продуктах, которые обеспечивают прочностной расчет моделей машин, механизмов, конструкций, в том числе подвижного состава железных дорог. **Результаты.** В статье представлен анализ проведенных теоретических и экспериментальных исследований прочностных качеств элементов подвижного состава на примере хребтовой балки грузовых вагонов; расчеты выполнены с использованием современного пакета прикладных программ. Представленный пример использования предложенного подхода показал его работоспособность и эффективность, а также правильность направления соответствующих научно-исследовательских работ. Предложенный подход может быть использован при решении подобных оптимизационных задач в научно-исследовательской и опытно-конструкторской практике транспортного машиностроения. **Научная новизна.** Авторами предложен метод определения показателей надежности и решения научно-прикладной проблемы расчета элементов грузовых вагонов с учетом особенностей эксплуатации и влияния режима нагрузки, что позволяет определять их долговечность еще на стадии проектирования. Разработана и исследована модель хребтовой балки грузового вагона, на основе которой получены зависимости, характеризующие напряженно-деформированное состояние ее элементов. Получены научно обоснованные результаты оценки прочностных качеств позвоночных балок грузовых вагонов в зависимости от их конструктивного исполнения. Рассмотрены аспекты, связанные с современным состоянием и перспективами развития железнодорожного транспорта, использованием программного комплекса при проектировании и расчетах подвижного состава в железнодорожной отрасли. **Практическая значимость.** Теоретические и экспериментальные исследования прочностных качеств элементов подвижного состава рассмотрены на примере хребтовой балки грузового вагона; расчеты выполнены с использованием современного пакета программ. Применение полученных результатов будет способствовать повышению безопасности движения грузовых вагонов и позволит улучшить технико-экономические показатели работы железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: метод конечных элементов; прочность элементов подвижного состава; напряжение в хребтовой балке вагона; подвижной состав; хребтовая балка грузового вагона

L. O. NEDUZHA^{1*}, A. O. SHVETS^{2*}

^{1*}Dep «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 776 84 98, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

^{2*}Dep «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropetrovsk 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

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF STRENGTH PROPERTIES OF SPINE BEAM OF FREIGHT CARS

Purpose. The purpose of this paper is to analyze the results of theoretical and experimental studies of the strength properties of rolling stock; search for design tools, modeling, selection, justification of the service life extension of freight cars and their elements. **Methodology.** The article is based on the finite element method (FEM). It makes possible to completely automate the calculation of mechanical systems, although, as a rule, it requires a much larger number of computational operations than the classical methods of mechanics. The modern level of development of computer technology opens wide opportunities for the introduction of FEM into engineering practice. FEM is implemented in many well-known and widely distributed software products that provide strength analysis of models of machines, mechanisms, structures, including the rolling stock of railways. **Findings.** The article presents an analysis of the theoretical and experimental studies of the strength properties of rolling stock elements on the example of the spine beam of freight cars; calculations were performed using a modern application program package. The presented example of use of the offered approach has shown its operation capacity and efficiency, as well as correctness of the research direction. The offered approach can be used when solving similar optimization tasks in research and developmental practice of transport mechanical engineering. **Originality.** The authors proposed method of determining the reliability indicators and solving scientific and applied problem of calculating the elements of freight cars, taking into account the operation features and the loading mode impact. This allows determining their durability at the design stage. There were developed and investigated the models of the spine beam of a freight car, on the basis of which the dependences characterizing the stress-strain state of its elements were obtained. Scientifically substantiated results of the evaluation of strength properties of spine beams of freight cars were obtained depending on their design. The aspects related to the current state and development prospects of railway transport, the use of the software complex in the design and calculation of rolling stock in the railway industry are considered. **Practical value.** The theoretical and experimental studies of the strength properties of rolling stock elements were considered on the example of a spine beam in a freight car. Calculations were performed using a modern software package. The application of these results will contribute to increase the safety of freight cars and improve the technical and economic performance of railway transport.

Keywords: finite element method; strength of rolling stock; stress in spine beam of car; spine beam of freight car

REFERENCES

1. Avtomatizirovannye svarochnye komplekсы dlya svarki khrebtovykh balok gruzovykh vagonov. Retrieved from [http://www.tvagonm.com.ua/upload/iblock/44\(1/Pre8en1aИоп_5Yar_kompleksiJireb_balki.pdf](http://www.tvagonm.com.ua/upload/iblock/44(1/Pre8en1aИоп_5Yar_kompleksiJireb_balki.pdf). (in Russian)
2. Bubnov, V. M., Myamlin, S. V., & Mankevich, N. B. (2013). Improvement the strength characteristics of freight cars on bogies model 18-1711. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 4(193), 32-34. (in Russian)
3. Bubnov, V. M., Myamlin, S. V., & Gurzhi, N. L. (2009). Experimental studies of pivotally connected car platform for large-capacity containers model 13-1839. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 28, 12-16. (in Russian)
4. Vagony gruzovye i passazhirskie. *Metody ispytaniy na prochnost i khodovye kachestva: RD 24.050.37-95*. (1995). Moscow: GosNIIV. (in Russian)
5. Senko, V. I., Makeev, S. V., Chepur, A. D., Sheychenko, R. I., Litvinenko, A. V., Grabov, R. V., ... Chubanyan, M. A. (2016). Testing of the universal platform car. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*, 12(1184), 71-83. doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.10 (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Lukin, V. V., Shadur, L. A., Koturanov, V. N., Khokhlov, A. A., & Anisimov, P. S. (2000). *Konstruirovaniye i raschet vagonov: Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. Moscow: UMK MPS Rossii. (in Russian)
7. Kulieva, O. (2011). Plany i perspektyvy ukrainskykh zaliznyts. *Car Fleet*, 1, 8-10.
8. Senko, V. I., Makeev, S. V., Chepurnoy, A. D., Litvinenko, A. V., Sheychenko, R. I., Grabov, ... Chuban, M. A. (2015). Metodologicheskie osnovy rasshirennykh prochnostnykh i dinamicheskikh issledovaniy pri ispytaniyakh dlinnobaznykh platform. *Mekhanika ta mashynobuduvannia*, 1, 67-81. (in Russian)
9. Myamlyn, S. V., & Gorobets, V. L. (2011). Nauchnye metody otsenki resursa nesushchikh konstruktsiy podvizhnogo sostava. *Visnyk sertyfikatsii zaliznychnoho transportu*, 8, 12-17. (in Russian)
10. Neduzha, L. O., & Shvets, A. A. (2016). Application of apm WinMachine software for design and calculations in mechanical engineering. *Science and Transport Progress*, 2(62), 129-147. doi: 10.15802/stp2016/67328. (in Ukrainian)
11. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)*. (1996). Moscow: GOSNIIV: VNIIZhT. (in Russian)
12. Bondariev, O. M., Kostyrsia, S. A., Ursuliak, L. V., & Molchanov, S. Yu. (2017). *Opir materialiv: Metodychni vkazivky do vykonannia rozrakhunkovo-hrafichnykh robot: U dvokh chastynakh. Chastyna persha*. Dnipro: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
13. Putyato, A. V., Konovalov, E. N., & Afanaskov, P. M. (2016). Prediction of the residual resource of the coach hopper-batcher after long operation taking into account actual physical and mechanical characteristics of the material of the bearing structure. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 1(34), 26-35. (in Russian)
14. Tretyakov, A. V. (2004). *Upravlenie individualnym resursom vagonov v ekspluatatsii: Monografiya*. St. Petersburg: OM-Press. (in Russian)
15. Fomin, O. V. (2014). Applicability analysis of hexahedral hollow profiles as component elements of supporting systems for gondola cars. *Science and Transport Progress*, 6(54), 146-153. doi: 10.15802/stp2014/33403. (in Ukrainian)
16. Fomin, O. V. & Fomin, V. V. (2012). Vykorystannia profilu z pererizom u vyhladi priamokutnoi truby v yakosti elementiv karkasiv kuzoviv zaliznychnykh napivvagoniv. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3(174), 244-250. (in Ukrainian)
17. Fomin, O. V. (2013). Vprovadzhennia kruhlykh trub v yakosti skladovykh elementiv ram vantazhnykh vagoniv. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technologies*, 38(1011), 33-38. (in Ukrainian)
18. Chepurnoy, A. D., Litvinenko, A. V., Sheychenko, R. I., Grabov, R. V., & Chuban, M. A. (2015). Khodovye prochnostnye i dinamicheskie ispytaniya vagona-platformy. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Transport Engineering*, 31(1140), 111-128. (in Russian)
19. Chepurnoy, A. D., Litvinenko, A. V., Baranov, A. N., & Bondarenko, M. A. (2014). Eksperimentalnye issledovaniya gruzovogo vagona. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Transport Engineering*, 14(1057), 1-18. (in Russian)
20. Myamlin, S., Neduzha, L., Ten, O., & Shvets, A. (2013). Determination of Dynamic Performance of Freight Cars Taking Into Account Technical Condition of Side Bearers. *Science and Transport Progress*, 1(43), 162–169. doi: 10.15802/stp2013/9589. (in English)
21. Myamlin, S., Lunys, O., Neduzha, L., & Kyryl'chuk, O. (2017). Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars. *Transport Means: Proc. of 21st Intern. Scientific Conf.*, 973-976. (in English)
22. Myamlin, S., Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2010). Testing of Railway Vehicles Using Roller Rigs. *Procedia Engineering*, 187, 688-695. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.439. (in English)
23. Myamlin, S., Neduzha, L., Ten, O., & Shvets, A. (2010). Spatial Vibration of Cargo Cars in Computer Modeling with the Account of Their Inertia Properties. *Mechanika 2010: Proc. of 15th Intern. Conf.*, 325-328. (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна)

Надійшла до редколегії: 02.10.2017

Прийнята до друку: 03.01.2018

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**М. М. БІЛЯЄВ, І. В. КАЛАШНИКОВ,
В. А. КОЗАЧІНА**
РОЗРАХУНОК ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПІД
ЧАС ТЕРАКТУ: ЕКСПРЕС МОДЕЛЬ..... 7

М. М. БІЛЯЄВ, М. В. ЛЕМЕШ
МОДЕЛЮВАННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ОБРОБКИ СТІЧНОЇ
ВОДИ НА ОСНОВІ ШВИДКОДІЮЧОЇ ЧИСЕЛЬНОЇ
МОДЕЛІ 15

**С. М. ЕПОЯН, В. А. ЯРКІН, Г. І. СУХОРИКОВ,
С. П. БАБЕНКО**
ПЕРЕГОРОДЧАСТИЙ ЗМІШУВАЧ КОРИДОРНОГО
ТИПУ З ПОПЕРЕЧНИМИ ПОРИСТИМИ
ПЕРЕГОРОДКАМИ 24

О. М. ЛЯШЕНКО
МОДЕЛЬ КООРДИНАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ ОРГАНІВ
УПРАВЛІННЯ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ
ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ НАДЗВИЧАЙНИХ
СИТУАЦІЙ 33

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

С. Р. КОЛЕСНИКОВ
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ПАСАЖИРСЬКОГО РУХОМОГО СКЛАДУ: ОГЛЯД
ПАТЕНТІВ 44

**С. А. КОСТРИЦЯ, Ю. Г. СОБОЛЕВСЬКА,
А. Я. КУЗИШИН, А. В. БАТІГ**
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВАГОНА ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА
ДПКр-2 56

О. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, А. В. ЛАГУЗА
ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДРОСЕЛЮЮЧОГО
ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ 66

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

**В. О. ДЗЕНЗЕРСЬКИЙ, О. Б. ГНИЛЕНКО,
С. В. ПЛАКСІН, Л. М. ПОГОРІЛА,
Ю. В. ШКІЛЬ**
ПЕРСПЕКТИВНА ТРАНСПОРТНО-ЕНЕРГЕТИЧНА
СИСТЕМА НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ
МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
РОЗПОДІЛЕНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ..... 77

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

І. А. КЛЮШНИК
ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-
ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ 87

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Д. О. БАННИКОВ
ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПК
SCAD ДЛЯ АНАЛІЗУ РОБОТИ МАШИНОБУДІВНИХ
КОНСТРУКЦІЙ 98

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

О. В. ЩЕРБИНА, О. Г. ШИБАЄВ
ЕВРИСТИЧНИЙ МЕТОД ВІДБОРУ СУДЕН ДЛЯ
УЗГОДЖЕНОЇ РОБОТИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ 112

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Е. В. БІЛОШИЦЬКИЙ
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕСТАЦІОНАРНОГО
ТЕПЛООБМІНУ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА З
СИСТЕМОЮ ОПАЛЕННЯ..... 121

Л. О. НЕДУЖА, А. О. ШВЕЦЬ
ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ
ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ЯКОСТЕЙ ХРЕБТОВОЇ
БАЛКИ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА 131

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, И. В. КАЛАШНИКОВ,
В. А. КОЗАЧИНА**
РАСЧЕТ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РИСКА ПРИ
ТЕРАКТЕ: ЭКСПРЕСС МОДЕЛЬ 7

Н. Н. БЕЛЯЕВ, М. В. ЛЕМЕШ
МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СТОЧНОЙ ВОДЫ НА ОСНОВЕ
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ... 15

**С. М. ЭПОЯН, В. А. ЯРКИН, Г. И. СУХОРУКОВ,
С. П. БАБЕНКО**
ПЕРЕГОРОДЧАТЫЙ СМЕСИТЕЛЬ КОРИДОРНОГО
ТИПА С ПОПЕРЕЧНЫМИ ПОРИСТЫМИ
ПЕРЕГОРОДКАМИ 24

Е. Н. ЛЯШЕНКО
МОДЕЛЬ КООРДИНАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ
КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ
СИТУАЦИЙ 33

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

С. Р. КОЛЕСНИКОВ
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА: ОБЗОР ПАТЕНТОВ 44

**С. А. КОСТРИЦА, Ю. Г. СОБОЛЕВСКАЯ,
А. Я. КУЗЫШИН, А. В. БАТИГ**
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАГОНА ДИЗЕЛЬ-
ПОЕЗДА ДПКр-2 56

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, А. В. ЛАГУЗА
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ДРОССЕЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ
ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ РЕССОРЫ 66

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

**В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, А. Б. ГНИЛЕНКО,
С. В. ПЛАКСИН, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ,
Ю. В. ШКИЛЬ**
ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТРАНСПОРТНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ
ИНТЕГРАЦИИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ
ТЕХНОЛОГИИ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ 77

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТА И ЭКОНОМИКИ

И. А. КЛЮШНИК
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ
ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ 87

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

Д. О. БАННИКОВ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНО-
ОРИЕНТИРОВАННОГО ПК SCAD ДЛЯ АНАЛИЗА
РАБОТЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ 98

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ

О. В. ЩЕРБИНА, А. Г. ШИБАЕВ
ЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОТБОРА СУДОВ ДЛЯ
СОГЛАСОВАННОЙ РАБОТЫ ВОДНОГО
ТРАНСПОРТА 112

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

Э. В. БЕЛОШИЦКИЙ
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО
ТЕПЛООБМЕНА ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ С
СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ 121

Л. А. НЕДУЖАЯ, А. А. ШВЕЦ
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ КАЧЕСТВ
ХРЕБТОВОЙ БАЛКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА 131

CONTENTS

TRANSPORT ECOLOGY

M. M. BILIAIEV, I. V. KALASHNIKOV, V. A. KOZACHYNA CALCULATION OF TERRORIST RISK IN THE TERRORIST ACTION: EXPRESS MODEL	7
M. M. BILIAIEV, M. V. LEMESH MODELING OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT ON THE BASIS OF QUICK-COMPUTING NUMERICAL MODEL	15
S. M. EPOYAN, V. A. YARKIN, G. I. SUKHORUKOV, S. P. BABENKO CORRIDOR-TYPE BAFFLED MIXING BASIN WITH CROSS POROUS BARRIERS	24
O. M. LIASHENKO CONTROL BODY COORDINATION MODEL IN THE PROCESS OF RESPONSE TO LARGE-SCALE EMERGENCIES	33

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

S. R. KOLESNYKOV IMPROVEMENT OF LIFE SUPPORT SYSTEMS OF PASSENGER ROLLING STOCK: PATENT REVIEW	44
S. A. KOSTRITSKA, Y. H. SOBOLEVS'KA, A. Y. KUZYSHYN, A. V. BATH MATHEMATICAL MODEL OF DPKR-2 DYSEL TRAIN CAR	56
O. H. REIDEMEISTER, A. V. LAGUZA DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF THROTTLING DEVICE FOR PNEUMATIC SPRING	66

ELECTRIC TRANSPORT

V. O. DZENZERSKIY, A. B. GNILENKO, S. V. PLAKSIN, L. M. POGORELAYA, Y. V. SHKIL' PERSPECTIVE TRANSPORT-POWER SYSTEM BASED ON THE INTEGRATION OF MAGLEV-TECHNOLOGY AND DISTRIBUTED PHOTO-ELECTRIC STATION	77
--	----

ELECTRIC TRANSPORT

I. A. KLIUSHNYK RESEARCH OF RATIONAL CHARACTERISTICS OF THE DATA COMMUNICATION LINKS OF THE INFORMATION AND MEASURING SYSTEM	87
--	----

NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODEL. MACHINES AND MECHANISMS

D. O. BANNIKOV USAGE OF CONSTRUCTION-ORIENTED SOFTWARE SCAD FOR ANALYSIS OF WORK OF MACHINE- BUILDING STRUCTURES	98
--	----

INDUSTRIAL TRANSPORT

O. V. SHCHERBINA, A. G. SHIBAEV HEURISTIC METHOD OF SHIPS SELECTION FOR THE COORDINATED WORK OF WATER TRANSPORT	112
--	-----

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

E. V. BILOSHYTSKIY MATHEMATICAL MODEL OF UNSTEADY HEAT TRANSFER OF PASSENGER CAR WITH HEATING SYSTEM	121
L. O. NEDUZHA, A. O. SHVETS THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF STRENGTH PROPERTIES OF SPINE BEAM OF FREIGHT CARS	131

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, присланих списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 1 (73) 2018

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – А. О. Каїра, О. В. Помінова

Літературна обробка – Ю. Г. Дішкант

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 17,55. Тираж 300 пр. Зам. №02/01

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Научное издание

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ. ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 1 (73) 2018

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова

Компьютерная верстка – А. О. Каира, О. В. Поминова

Литературная обработка – Ю. Г. Дишкант

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 17,55. Тираж 300 экз. Зак. №02/01

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна**

Адрес редакции, издателя:

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днипро, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Печать:

Издательство «Герда», 49000, г. Днипро, пр. Д. Яворницкого, 60

Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO
UNİVERSİTETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

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

No. 1 (73) 2018

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – A. O. Kaira, O. V. Pominova

Redaction – Yu. H. Dishkant

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 17,55. Circulation 300. Order no. 02/01

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

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

