



ISSN 2307-3489 (Print)

ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 3(81)

•• 2019 ••

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 3 (81) 2019

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

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

Дніпро

2019

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пішінко О. М., доктор технічних наук
Пічуров С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

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

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України.
Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 24.06.2019 р., протокол № 13

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

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

Видання публікується з 1936 р.:

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

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

№ 3 (81) 2019

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

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

Днепро

2019

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

*ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА*

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Пичугов С. А., доктор физико-математических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук
по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).
Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др.
Печатается по решению ученого совета университета от 24.06.2019 г., протокол № 13

Издатель

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

Адрес
учредителя

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

Издание публикуется с 1936 г.:

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

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

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

Scientific journal

No. 3 (81) 2019

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

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

Dnipro

2019

Founder:

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

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

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

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

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 г. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 24.06.2019, Protocol no. 13
Publisher	Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 502.3:[504.5:519.87]

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, И. В. КАЛАШНИКОВ², В. И. ШИНКАРЕНКО³, В. Н. ГОРЯЧКИН⁴

^{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

²Харьковское отделение филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» акционерного общества «Українська залізниця», ул. Котляра, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzpr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

³Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

⁴Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

Цель. Работа предполагает разработку численных моделей для оценки эффективности применения воздушной завесы возле здания в случае химического загрязнения. **Методика.** Для описания процесса рассеивания химически опасного вещества, эмитированного при чрезвычайных ситуациях, использовано трехмерное уравнение массопереноса примеси в атмосферном воздухе. Для расчета поля скорости воздушной среды возле здания при наличии воздушной завесы использована модель потенциального течения. Моделирующие уравнения учитывают поле скорости ветрового потока, атмосферную диффузию, интенсивность выброса химически опасного вещества в атмосферу. Для численного интегрирования уравнений массопереноса использованы неявные разностные схемы. Применение разработанной модели позволяет оперативно рассчитывать поле концентрации химически опасного вещества возле здания при наличии воздушной завесы. **Результаты.** Построены численные модели для расчета аэродинамики воздушного потока и концентрационного поля возле здания при использовании воздушной завесы. Их можно применить для проведения оперативных расчетов размеров, интенсивности зон загрязнения, которые формируются в атмосфере при выбросе химических веществ на промышленных площадках. Разработанные численные модели могут быть реализованы на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать их для решения задач при разработке плана ликвидации при аварийной ситуации (ПЛАС). Для практического применения этих моделей необходима стандартная входная информация. Представлены результаты лабораторного эксперимента. **Научная новизна.** Предложены эффективные трехмерные численные модели для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха при выбросе в атмосферу химически опасных веществ и при использовании воздушной завесы возле промышленного здания. Модели позволяют оперативно рассчитать эффективность применения воздушной завесы. **Практическая значимость.** Разработанные численные модели позволяют решать прикладные задачи, возникающие при разработке ПЛАСа для химически опасных объектов.

Ключевые слова: химическое загрязнение атмосферы; чрезвычайная ситуация; численное моделирование

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Введение

В области промышленной безопасности можно выделить две важные задачи: прогноз уровня загрязнения окружающей среды при экстремальных ситуациях на промышленных объектах, связанных с выбросом химически опасных веществ, и защита окружающей среды от загрязнения [1–4, 7–14]. Для оценки размеров зон химического заражения в Украине используют нормативную методику прогноза последствий аварий на химически опасных объектах и транспорте, а также методику ОНД-86. Кроме этого, для решения задач по расчету зон химического заражения широко применяют модель Гаусса [4]. Для решения второй задачи можно использовать только CFD-моделирование [2, 3, 5, 11] или физический эксперимент. Актуальной задачей остается разработка эффективных методов защиты атмосферы от загрязнения при аварийных ситуациях, поскольку именно атмосфера подвергается загрязнению в первую очередь.

Цель

Основной целью данной работы является разработка численных моделей для проведения исследований по оценке эффективности применения воздушной завесы возле зданий, чтобы минимизировать уровень химического загрязнения.

Методика

Воздушная завеса – это использование направленного движения воздуха с целью изменения направления движения облака токсичного вещества. Использование воздушной завесы у промышленных зданий позволяет создать локальные зоны, где величина поражающего фактора – концентрации опасного вещества – значительно меньше, чем при отсутствии завесы. На этапе принятия решения нужно определить эффективность использования воздушной завесы с учетом размеров здания, скорости ветра, скорости воздушного потока завесы и т. д.

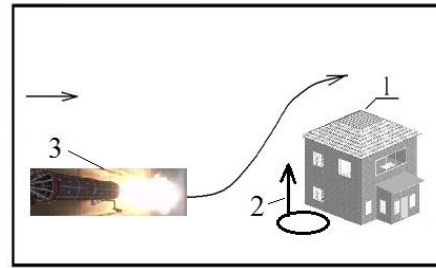


Рис. 1. Схема использования воздушной завесы у промышленного здания:
1 – здание; 2 – воздушная завеса; 3 – источник выброса химически опасного вещества

Fig. 1. Air curtain scheme at an industrial building:
1 – building; 2 – air curtain; 3 – source of emission of a chemically hazardous substance

На первом этапе исследований была выдвинута рабочая гипотеза о том, что применение воздушной завесы возле промышленного здания позволяет снизить концентрацию опасного вещества в случае возникновения экстремальной ситуации. Для проверки этой гипотезы был проведен эксперимент. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Эксперименты проведены на кафедре «Гидравлика и водоснабжение» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ).

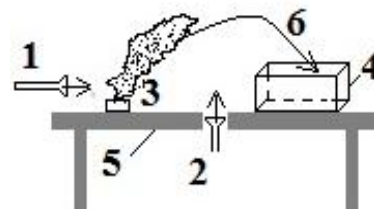


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
1 – воздуходувка; 2 – воздуходувка;
3 – место эмиссии опасного вещества;
4 – модель здания; 5 – стол;
6 – пространство внутри модели здания

Fig. 2. Scheme of the experimental facility:
1 – blower; 2 – blower; 3 – emission point of a hazardous substance; 4 – a building model; 5 – table; 6 – space inside a building model

Моделирование проведено в масштабе 1:100. Размеры модели здания: высота 10 см, ширина 30 см, длина 30 см. Скорость воздушного потока составляла 5,7–6,1 м/с (воздуходувка 1). Скорость воздушной струи составляла 8,6–9,1 м/с (воздуходувка 2).

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и 4.

Как видно из рис. 3, при отсутствии воздушной завесы струя продуктов горения практически полностью охватывает торцевую сторону модели здания (линии 1–1 и А–С) и «заходит» над зданием и внутрь модели через отверстие сверху (позиция С на рис. 3).

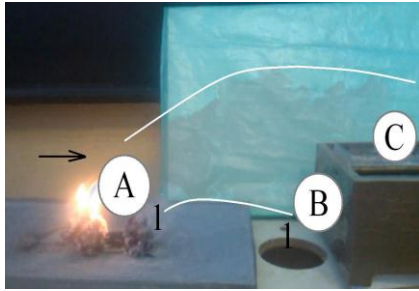


Рис. 3. Зона загрязнения возле модели здания (нет воздушной завесы):
А–В – нижняя граница шлейфа;
А–С – верхняя граница шлейфа

Fig. 3. Pollution area near a building model (no air curtain):
А–В – lower bound of a plume;
А–С – high bound of a plume

На рис. 4 представлена зона загрязнения при наличии воздушной завесы возле модели здания.

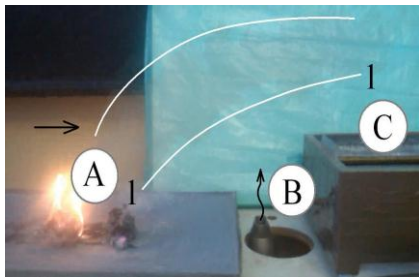


Рис. 4. Зона загрязнения возле модели здания (есть воздушная завеса):
1–1 – нижняя граница шлейфа; А – источник эмиссии опасного вещества; В – середина торцевой стенки модели;
С – сечение, где проводились измерения (над моделью здания и внутри ее)

Fig. 4. Pollution area near the building model (there is an air curtain):
1–1 – lower bound of a plume; А – a source of emission of a hazardous substance; В – center of the end wall in a model; С – section where measurements were taken (above a building model and inside it)

Из данного рисунка видно, что воздушная завеса привела к отклонению загрязненной струи от модели здания (линия 1–1 – нижняя

граница струи), т. е. эффект защиты наблюдается визуально.

Проведение физического эксперимента для оценки эффективности применения воздушной завесы возле здания требует много времени на его постановку, реализацию, обработку данных. Поэтому для практики важно иметь теоретические методы оценки эффективности применения воздушной завесы, чтобы быстро определять рациональные параметры этой системы защиты для конкретных местных условий. Поэтому на следующем этапе исследования были разработаны численные модели для решения поставленной задачи.

Для расчета концентрационных полей химического агента возле здания при использовании воздушной завесы применяют трехмерное уравнение массопереноса [2, 3, 5, 9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C =$$

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

$$+ \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i), \quad (1)$$

где C – концентрация химического агента; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициенты турбулентной диффузии; σ – коэффициент, учитывающий вымывание химического агента осадками или его химическую трансформацию в атмосфере; u, v, w – компоненты вектора скорости ветра; w_s – скорость гравитационного оседания химического агента; Q – интенсивность выброса химического агента; $\delta(x - x_i)(y - y_i)(z - z_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i, z_i – координаты источника выброса химически опасного вещества; t – время.

Принимаем, что устойчивость атмосферы определяют значением коэффициентов атмосферной диффузии.

Так как задача состоит в создании численных моделей для оценки эффективности применения воздушной завесы с целью снижения уровня загрязнения воздушной среды возле здания, то возникает необходимость расчета неравномерного поля скорости воздушного по-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

тока возле здания. Для решения этой задачи будем применять модель безвихревых течений идеальной жидкости:

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

где P – потенциал скорости.

Для расчета компонент вектора скорости ветра используют зависимости:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}.$$

При численном решении трехмерного уравнения для потенциала скорости выполним такое расщепление на дифференциальном уровне:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2};$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}.$$

Для аппроксимации каждого уравнения из данной системы будем использовать такие разностные выражения:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i-1,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j-1,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta y};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k-1}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta z};$$

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z}.$$

Для численного интегрирования трехмерного уравнения массопереноса будем использовать неявную попеременно-треугольную разностную схему расщепления [2, 5]. Исходное моделирующее уравнение расщепляют на три уравнения. Первое уравнение учитывает рассеивание примеси только за счет ветрового потока, второе – за счет атмосферной диффузии, третье учитывает влияние источника эмиссии на формирование зоны загрязнения. Для кодирования разностных уравнений использован FORTRAN.

При применении разработанных численных моделей для решения задач рассматриваемого класса необходимо задать такую информацию:

- размеры расчетной области;
- геометрическую форму здания (зданий);
- параметры набегающего воздушного потока;
- место расположения воздушной струи;
- скорость воздушной струи;
- форму облака химического агента, которое движется на здание;
- концентрацию химического агента в облаке.

Результаты

Разработанные численные модели были использованы для решения прикладной задачи. Постановка задачи: рассматриваем миграцию первичного облака хлора с концентрацией $C = 100$ единиц (концентрация дана в безразмерном виде). Скорость ветра 4 м/с. На пути облака располагается здание. Возле неветреной стороны здания создаем воздушную завесу для снижения концентрации химического агента.

На рис. 5–8 показано концентрационное поле хлора возле здания при отсутствии воздушной завесы и при ее применении.

Анализируя зоны химического загрязнения, которые представлены на приведенных рис. 5–8, мы видим, что при использовании воздушной завесы зона загрязнения (граница токсичного облака) отдалается от промышленного здания, то есть происходит гидродинамическое влияние воздушной струи на формирование зоны химического загрязнения.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

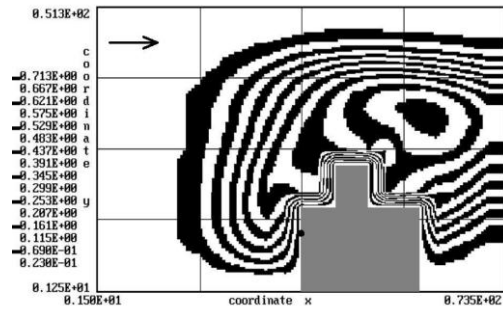


Рис. 5. Зона загрознення у промисленого здания для моменту времени $t = 5,5$ с. (нет воздушной завесы, сечение $y = 25$ м)

Fig. 5. Pollution zone at an industrial building for timepoint $t = 5.5$ s. (no air curtain, section $y = 25$ m)

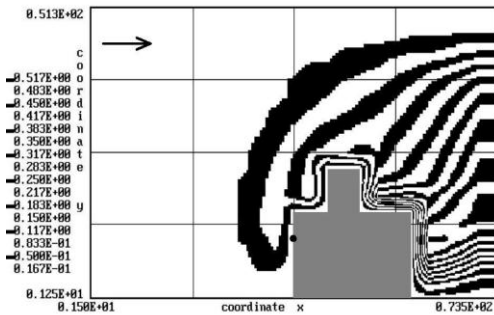


Рис. 6. Зона загрознення у промисленого здания для моменту времени $t = 7,5$ с. (нет воздушной завесы, сечение $y = 25$ м)

Fig. 6. Pollution zone at an industrial building for timepoint $t = 7.5$ s. (no air curtain, section $y = 25$ m)

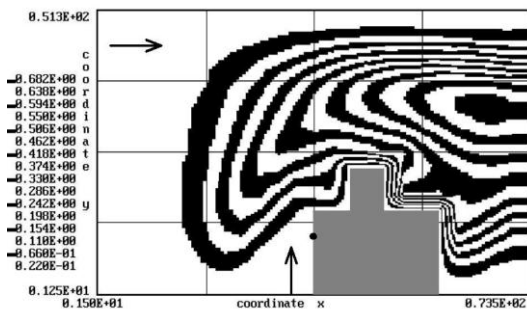


Рис. 7. Зона загрознення у промисленого здания для моменту времени $t = 5,5$ с. (воздушная завеса, сечение $y = 25$ м, скорость воздушного потока 20 м/с)

Fig. 7. Pollution zone at an industrial building for timepoint $t = 5.5$ s. (no air curtain, section $y = 25$ m, air-flow rate 20 m/s)

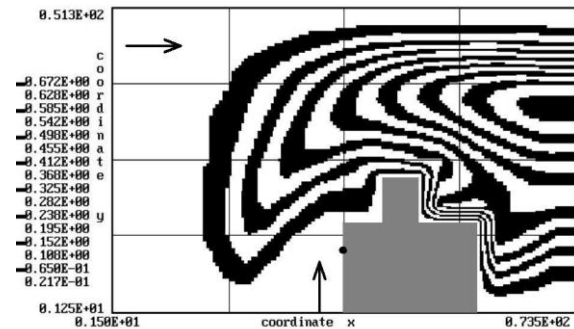


Рис. 8. Зона загрознення у промисленого здания для моменту времени $t = 5,5$ с. (воздушная завеса, сечение $y = 25$ м, скорость воздушного потока 30 м/с)

Fig. 8. Pollution zone at an industrial building for timepoint $t = 5.5$ s. (no air curtain, section $y = 25$ m, air-flow rate 30 m/s)

В табл. 1 приведены данные о концентрации химически опасного вещества в реперной точке у промышленного здания – это место показано на рис. 5–8 в виде точки на стенке здания.

Таблица 1

Безразмерное значение концентрации опасного вещества у промышленного здания

Table 1

Dimensionless concentration of a hazardous substance at an industrial building

Время	Концентрация (нет воздушной завесы)	Концентрация (скорость воздушного потока 20 м/с)	Концентрация (скорость воздушного потока 30 м/с)
3,1	0,238	0,018	0,0041
3,5	0,273	0,017	0,0037
4,5	0,316	0,013	0,0025
5,5	0,300	0,008	0,0014

Как видно из табл. 1, использование воздушной завесы позволяет существенно уменьшить концентрацию опасного вещества у здания. Например, для момента времени 5,5 с концентрация опасного вещества в точке расположения рецептора при наличии воздушной завесы (скорость струи 30 м/с) в 210 раз меньше, чем при отсутствии завесы. То есть использование воздушной завесы позволяет снизить

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

риск токсического поражения людей у промышленного корпуса.

Отметим, что время расчета составляет порядка 7 с.

Научная новизна и практическая значимость

В статье рассмотрены численные 3D-модели для оценки эффективности применения воздушной завесы возле здания. Для расчета неравномерного поля скорости воздушного потока возле здания применена модель безвихревых течений несжимаемой среды. Для расчета концентрационных полей использовано уравнение массопереноса.

При применении разработанных численных моделей используют стандартную входную информацию. Особенностью моделей является быстрота расчета, что позволяет их использовать при проведении серийных расчетов.

Выводы

В работе представлены численные 3D-модели для оценки эффективности применения воздушной завесы. Расчет выполнен на базе фундаментальных уравнений механики сплошной среды. Дальнейшее совершенствование выбранного научного направления следует проводить в области создания 3D-модели для расчета загрязнения воздушной среды на базе уравнений Навье–Стокса.

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. Гулько, 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. Гулько, 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.
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. Bai, Y. Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation / Y. Bai // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 71. – P. 679–684. doi: <http://doi.org/10.3303/CET1871114>
7. 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.
8. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
9. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
10. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations [Электронный ресурс] / Croner-i. – Режим доступа: <http://clc.am/OnkmUw> – Загл. с экрана. – Проверено : 29.03.2019.
11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Z. Naserzadeh, F. Atabi, F. Moattar, N. M. Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communications. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
12. Oyjinda, P. Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone [Электронный ресурс] / P. Oyjinda, N. Pochai // Advances in Mathematical Physics. – 2017. – Vol. 2017. – Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/amp/2017/5287132/> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019. doi: <http://doi.org/10.1155/2017/5287132>

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

13. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Електронний ресурс] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Режим доступа: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Електронний ресурс] / О. Zavila, Р. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // The science for population protection. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 23.04.2019.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, І. В. КАЛАШНИКОВ², В. І. ШИНКАРЕНКО³, В. М. ГОРЯЧКІН⁴

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

²Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» акціонерного товариства «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

³Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

⁴Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-6115-7162

ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ПІД ЧАС ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ НА ХІМІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

Мета. Робота передбачає розробку чисельних моделей для оцінки ефективності застосування повітряної завіси біля будівлі у разі хімічного забруднення. **Методика.** Для описання процесу розсіювання хімічно небезпечної речовини, емітованої за надзвичайних ситуацій, використано тривимірне рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі. Для розрахунку поля швидкості повітряного середовища біля будівлі за наявності повітряної завіси використано модель потенційної течії. Моделювальне рівняння враховує поле швидкості вітрового потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність викиду хімічно небезпечної речовини в атмосферу. Для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу використані неявні різницеві схеми. Застосування розробленої моделі дозволяє оперативно розраховувати поле концентрації хімічно небезпечної речовини біля будівлі за наявності повітряної завіси. **Результати.** Побудовані чисельні моделі для розрахунку аеродинаміки повітряного потоку й концентраційного поля біля будівлі з використанням повітряної завіси. Їх можна застосувати для проведення оперативних розрахунків розмірів, інтенсивності зон забруднення, які формуються в атмосфері під час викиду хімічних речовин на промислових майданчиках. Розроблені чисельні моделі можуть бути реалізовані на комп'ютерах малої й середньої потужності, що дозволяє широко використовувати їх для вирішення завдань під час розробки плану ліквідації в разі аварійної ситуації (ПЛАС). Для практичного застосування цих моделей необхідна стандартна вхідна інформація. Представлені результати лабораторного експерименту. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективні тривимірні чисельні моделі для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час викиду в атмосферу хімічно небезпечних речовин і використання повітряної завіси біля промислової будівлі. Моделі дозволяють оперативно розрахувати ефективність застосування повітряної завіси. **Практична значимість.** Розроблені чисельні моделі дозволяють розв'язувати прикладні задачі, що виникають під час розробки ПЛАСу для хімічно небезпечних об'єктів.

Ключові слова: хімічне забруднення атмосфери; надзвичайна ситуація; чисельне моделювання

М. М. BILIAIEV^{1*}, I. V. KALASHNIKOV², V. I. SHYNKARENKO³, V. M. HORIACHKIN⁴

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

²Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway», Kotliar St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

³Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

⁴Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

ATMOSPHERE PROTECTION FROM POLLUTION IN ACCIDENTAL SITUATIONS AT CHEMICALLY HAZARDOUS OBJECTS

Purpose. The work involves the development of numerical models to assess the effectiveness of the air curtain usage near the building in the event of chemical pollution. **Methodology.** To describe the process of dispersion of a chemically hazardous substance, emitted in emergency situations, the three-dimensional equation of impurity mass transfer in atmospheric air is used. To calculate the air velocity field near the building in the presence of an air curtain, a potential-flow model is used. The modelling equations take into account the velocity field of the wind flow, atmospheric diffusion, and the intensity of the emission of a chemically hazardous substance into the atmosphere. For the numerical integration of the mass transfer equations, implicit difference schemes are used. The complex of programs was created to solve the problem of calculating pollution zones near buildings in the presence of an air curtain. The application of the developed model allows you to quickly calculate this field of concentration of a chemically hazardous substance near the building in the presence of an air curtain. **Findings.** Numerical models for calculating the aerodynamics of the air flow and the concentration field near the building when using an air curtain were constructed. They can be used to carry out operational calculations of the size, intensity of pollution zones, which are formed in the atmosphere during the emission of chemicals at industrial sites. The developed numerical models can be implemented on computers of low and medium power, which allows it to be widely used for solving problems in developing an emergency response plan (ERP). For practical application of the developed numerical models, standard input information is required. Authors present the results of a laboratory experiment. **Originality.** Effective three-dimensional numerical models are proposed for estimating the level of atmospheric air pollution when emission of chemically hazardous substances into the atmosphere and using an air curtain near an industrial building. Models allow you to quickly calculate the effectiveness of the air curtain usage. **Practical value.** The developed numerical models allow solving applied problems arising in the development of ERP for chemically hazardous objects.

Keywords: chemical pollution of the atmosphere; emergency; numerical simulation

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk: Analiz i otsenka: Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., Kirichenko, P. S., & Muntian, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoy Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
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)
6. Bai, Y. (2017). Grey Mathematics Model for Atmospheric Pollution Based on Numerical Simulation. *Chemical Engineering Transactions*, 71, 679-684. doi: <http://doi.org/10.3303/CET1871114> (in English)
7. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Doctoral dissertation). Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania. (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

8. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
9. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. Dordrecht. doi: http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
10. Cefic Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrieved from <http://clc.am/OnkmUw> (in English)
11. Naserzadeh, Z., Atabi, F., Moattar, F., & Nejad, N. M. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 10(1), 192-204. (in English)
12. Oyjinda, P., & Pochai, N. (2017). Numerical Simulation to Air Pollution Emission Control near an Industrial Zone. *Advances in Mathematical Physics*, 2017. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/amp/2017/5287132/> doi: <http://doi.org/10.1155/2017/5287132> (in English)
13. Government of Alberta. (2017). Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/eng/22/112.pdf> (in English)

Поступила в редколлегию: 06.02.2019

Принята к печати: 03.06.2019

UDC 502.3:613.648.4

T. I. RUSAKOVA^{1*}^{1*}Dep. «Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Kazakov St., 18,
Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578**METHOD FOR PREDICTING PARAMETERS OF THE AEROIONIC
MODE IN OPEN TERRAIN GROUND AREAS**

Purpose. The scientific work is devoted to the development of a new method for forecasting aeroionic mode in working areas at industrial sites, taking into account ionizing sources and surrounding obstacles. **Methodology.** To find the concentration of positive aeroions, dust and negative aeroions, we use 3D mass transfer equations that take into account the rate of recombination of ions having different polarity and the rate of recombination of ions with dust particles. The numerical solution is based on the integration of the mass transfer equations using the finite-difference method, which turns out to be stable for any step in time. To determine the components of the air velocity vector, a three-dimensional model of the potential flow is used, where the Laplace equations for the velocity potential are the modeling equations. **Findings.** The mathematical method of numerical calculation of the concentration of positive, negative aeroions and dust has been developed. A feature of the method is the possibility of predicting the aeroionic mode, taking into account all physical factors that significantly affect the formation of concentration zones of aeroions in working areas at industrial sites. The method is not tied to a particular industrial site, it allows us to estimate the value of the concentration of aeroions both locally and in the entire calculated region. **Originality.** A method for prediction of aeroionic mode in working areas is developed based on 3D modeling of the propagation of negative, positive aeroions and dust under the influence of wind and diffusion, which allows to obtain results at each point of space or in a specific cross-section. **Practical value.** The proposed method of forecasting was used to solve the problem of estimating aeroionic mode in industrial zones in the open area of the industrial site of the Dnipro oil extraction plant in the presence of emission sources: positive aeroions during the operation of vehicles and respiration of workers; dust during the movement of workers and vehicles; negative aeroions of the ionizer installed in the working zone. The regularities of changes in the concentration of aeroions of various polarity and dust at a height of 1.7 m are determined, which corresponds to the position of the respiratory organs of workers. Quantitative results are needed in assessing the permissible working conditions in the workplaces of industrial sites of enterprises when creating new jobs and reengineering existing ones.

Keywords: ionization of air; sources of ion emission; numerical method; industrial site; concentration of aeroions

Introduction

Providing a certain degree of ionization of the air environment in the working area is one of the most important factors in maintaining a good state of health and high efficiency of staff. It has been established that a significant decrease in the content of charged particles (ions) in the air coincides with the appearance of unusual sickness in working people, fatigue complaints, depression, nausea, insomnia, irritability, respiratory disorders, and others. At the same time, the presence of people in conditions with moderately high ionization of the atmosphere, with the vast majority of negative ions - on the contrary, there is a beneficial effect on the body. The process of ionization of air consists in the transformation of neutral atoms and air molecules into electrically

charged particles (ions). Ions in the air (aeroions) can be formed as a result of natural and artificial ionization.

Natural ionization occurs as a result of the influence on the air of space and solar radiation and ionizing radiation (particles) that arise during the decay of long-lived radionuclides of the earth's crust (potassium-40, uranium-238, thorium-232, etc.). Natural ionization of the air environment is everywhere and constant in time. Artificial aerionization occurs under the influence of ionizing factors, which accompany some technological processes (X-ray and ultraviolet radiation, thermo-emission, photoelectric effect, etc.); as well as the effect of special devices – ionizers. The degree of ionization of air depends on the ratio of ionization and deionization processes. The latter is due to the recombination of

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

two ions of different polarities, adsorption of light ions on uncharged nuclei, condensation, neutralization of light and heavy ions by charges of the opposite sign, and others.

Assessment of the aeration degree of the environment is carried out by comparing the measured values with the standard ones. Artificial ionizers (high-voltage, induction, radiation, etc.) and efficient, well-organized ventilation of premises are widely used to normalize the ionic mode of the air environment, as the external clean air contains 2-5 times more ions than the air of indoor premises (50-100 ions/cm³).

Many works of domestic authors are devoted to the study of aeroionic mode. Modeling of aeroionic mode in working zones under conditions of artificial ionization is presented in the work [1]. The problem of the evaluation and the relationship between aerosol pollution and the aeroionic composition of air in the working zone is considered in the works [8–9]. The works [2, 11] are devoted to the modeling of the aeroionic mode in premises with artificial ionization using the means of numerical Modeling. The proposed program information system for the optimization of the microclimate in the premises is in [6]. The study of ways to improve the aeroionic mode of the working environment is presented in work [7]. The study of the microclimatic parameters influence of air exchange on the aeroionic composition of the air in the working premises and the modeling and prediction of the aeroionic composition dynamics of air are given in the works [4–5]. The methods for determining the concentration of aeroions and dust content are presented in the work [3]. The normalization of the aeroionic composition of air in office premises is considered in the work [15]. A large number of foreign works are devoted to the study of ionization processes for improving the health of employees [12–14, 16].

Purpose

The purpose of this study is to develop a new method for forecasting aeroionic mode in working areas at industrial sites, taking into account ionizing sources and surrounding obstacles (buildings).

Methodology

It is known that the formation of the concentration field of aeroions is influenced by a complex of physical factors: airflow, diffusion, electric field effect and others. In addition, there is the interaction of ions of different polarity and their interaction with particles of dust. To account for these processes during the Modeling of aeroions dispersion, the 3D equation of mass transfer is used. It is written for each component (positive aeroions, dust, negative aeroions). The Modeling equations have the form:

– to describe the process of dispersion of positive ions

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{\partial u A_p}{\partial x} + \frac{\partial v A_p}{\partial y} + \frac{\partial w A_p}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_p}{\partial z} \right) - \\ - \alpha A_p A_n - \beta A_p A_d + \\ + \sum_{p_i=1}^n Q_{p_i}(t) \delta(x - x_{p_i}) \delta(y - y_{p_i}) \delta(z - z_{p_i}); \quad (1) \end{aligned}$$

– for modeling the transfer of dust

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial u A_d}{\partial x} + \frac{\partial v A_d}{\partial y} + \frac{\partial w A_d}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_d}{\partial z} \right) + \\ + \sum_{d_i=1}^n Q_{d_i}(t) \delta(x - x_{d_i}) \delta(y - y_{d_i}) \delta(z - z_{d_i}); \quad (2) \end{aligned}$$

– to describe the process of dissipating negative ions

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_n}{\partial t} + \frac{\partial (u + bE) A_n}{\partial x} + \frac{\partial (v + bE) A_n}{\partial y} + \\ + \frac{\partial (w + bE) A_n}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_n}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_n}{\partial z} \right) - \alpha A_n A_p - \beta A_n A_d + \\ + \sum_{n_i=1}^n Q_{n_i}(t) \delta(x - x_{n_i}) \delta(y - y_{n_i}) \delta(z - z_{n_i}). \quad (3) \end{aligned}$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

The denotations of physical parameters in these equations are as follows:

A_p , A_n , A_d – the concentration of positive, negative aeroions and dust particles, respectively; u , v , w – components of the velocity vector of the air flow; μ_x , μ_y , μ_z – coefficients of diffusion; t – time; α – the rate of recombination of ions with different polarity; β – the rate of recombination of ions with dust particles; $Q_{A_{p_i}}(t)$ – the intensity of the emission of positive ions at the corresponding coordinate points x_{n_i} , y_{n_i} , z_{n_i} ; $\delta(x - x_{n_i})\delta(y - y_{n_i})\delta(z - z_{n_i})$ – delta-function of Dirac; b – coefficient of ions mobility; E – electric field strength.

At the boundary of the air flow inlet into the calculated area is the initial condition:

$$A_p|_{entrance} = A_{p_0}, \quad (4)$$

where A_{p_0} – the initial concentration of aeroions.

At the boundary of the area outlet from the calculated we set a «soft» boundary condition:

$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} = 0$, where $\vec{n}$ – unit vector of the external normal to the solid surface.

For numerical implementation such a boundary condition is recorded:

$$A_p(i+1, j) = A_p(i, j), \quad (5)$$

where $A_p(i+1, j)$ – the values of ions in the last boundary cell, $A_p(i, j)$ – the value of ions in the penultimate difference cell.

On the ground surface and all solid surfaces, the boundary condition for non-permeability is set:

$$\frac{\partial A_p}{\partial \vec{n}} = 0. \quad (6)$$

This condition physically means that the flow of ions at these boundaries is zero.

Using the Modeling equations (1) – (3) speed components $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ must satisfy the equation of continuity:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

To fulfill this condition one should solve an aerodynamic problem for determining the velocity field. To determine the components of the air velocity vector, a three-dimensional model of the potential flow is used, where the Laplace equation for the velocity potential serves as the simulating equation:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (8)$$

where P – speed potential.

Components of the velocity vector of the air are related to the velocity potential by the following relationships:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (9)$$

For the Laplace equation, the following boundary conditions are set:

– on firm boundaries the condition of non-permeability is set $\frac{\partial P}{\partial \vec{n}} = 0$;

– on the boundary of the flow outlet from the calculated region the Dirichlet boundary condition is set $P = const$;

– at the boundary of the air flow inlet into the calculated area, the boundary condition is set $\frac{\partial P}{\partial \vec{n}} = V$, where V – known velocity of the inflow.

When simulating the propagation of aeroions, it is necessary to take into account the influence of the electric field on this process. Since the aeroions have a charge, they generate an electric field E . For the Modeling of the electric field, the following equation is used [2, 12]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{q_e}{\varepsilon_0}, \quad (10)$$

where ε_0 – dielectric permeability; q_e – volumetric charge density.

From equation (5.7) we can go to the scalar potential, if we take into account such dependence:

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (11)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Then we obtain the Poisson equation:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{q_e}{\varepsilon_0}, \quad (12)$$

where $q_e = -e \cdot A_p(x, y, z)$, $A_p(x, y, z)$ – concentration of positive aeroions; φ – scalar potential; e – elementary charge. On the basis of this equation electric field Modeling is carried out.

As the boundary condition, the condition of electrical insulation is used:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} = 0,$$

where $\vec{n}$ – unit vector of the external normal to the solid surface.

For numerical integration of the mass transfer equations, a difference scheme is used based on the geometric and physical splitting of the simulating equations (1) – (3). In each of the four fractional steps, only one direction of perturbation transfer is taken into account; the fifth split step takes into account the change in the concentration of aeroions due to the action of the emission source. The calculation is performed on a rectangular difference grid. Concentration of quantities A_p , A_n , A_d is determined in the centers of the difference cells, whereas the components of the velocity vector of the air are set at the boundaries of the difference cells [2, 11–12].

Findings

To estimate the aeroionic mode in the working zones, based on the developed method, it is necessary to determine the aeroions emission intensity from the specific sources. As already noted, one of these sources is the worker, who exhales positive aeroions. Physical experiment was conducted to obtain scientifically substantiated information regarding the magnitude of such emission.

For the experiment, a group of people of different ages was selected: 16 people in each age group. The mouth area was measured $S=9.5 \text{ cm}^2$, the rate of air flow when exhaled was on average $V=0.4 \text{ m/s}$, flow rate $Q=V \cdot S \text{ m}^3/\text{s}$, the intensity of the emission of positive aeroions when exhaled $I=V \cdot S \cdot C \text{ ions/s}$, where C – concentration of positive aeroions at exhalation. The results of

measuring the average concentration of positive aeroions when exhaling for each age group are given in Table 1.

Experiment to measure the concentration of aeroions from human exhalation was carried out using the KT-401 AIRION TESTER.

Table 1

The value of the concentration of positive aeroions when person exhales

Age of a person, years	Concentration of positive aeroions, ions/cm ³ ,
8–9	166–176
18–19	232–349
40	277–329
78	210–256

The data obtained on the basis of the conducted physical experiment, were used during computational experiments. During the experiments it was taken into account that the source of positive aeroion emission during exhalation had a periodic action, namely, exhalation for 1 s in quantity Q , the inhalation – emission is absent and after 2 s again exhalation with the same emission. That is, the source of periodic emission $Q(t)$ is known.

Verification of the developed forecast method was carried out. A test task was solved to calculate the emission of positive aeroions with exhaust gases of vehicles.

During the physical experiment, the positive aeroions at different distances from the Daewoo Matiz exhaust pipe were measured using the KT-401 AIRION TESTER. The velocity of wind and gas flow at the exhaust pipe outlet was measured using an anemometer PM 6252 B Digital Anemometer. The speed of the air flow was $V_{\text{air}}=1.2\text{--}1.4 \text{ m/s}$, and the speed of gas flow $V_{\text{gas}}=1.7\text{--}1.9 \text{ m/s}$, diameter of the exhaust pipe hole $d=32 \text{ mm}$.

The method of conducting the experiment was as follows: the concentration of positive aeroions was measured at a height of 320 mm from the ground surface at different distances from the exhaust pipe. To obtain data on the intensity of emissions, the calculation was made according to the ratio $Q=V_{\text{gas}} \cdot S \cdot C$, where V_{gas} – the velocity of the gas flow in the outlet cross section of the ex-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

haust pipe, S – area of the outlet cross section of the exhaust pipe hole, C – the concentration of positive aeroions in the outlet cross section. Immediately during the experiment parameters V_{gas} and C were measured at a distance of 0.5 cm from the outlet cross section of the exhaust pipe hole. The obtained data were used as input information for numerical calculation on the basis of the developed method. Using this method, the impurity concentration values at the points of measurements were also calculated. Table 2 shows the results of experimental measurements and the calculated data obtained with the help of the developed numerical calculation method.

Table 2

Concentration of positive aeroions at different distances from the emission source

Distance from exhaust pipe of a car, cm	Concentration of positive aeroions, ions/cm ³ (experiment)	Concentration of aeroions, ions/cm ³ (calculation)
5	1 400–1 443	1 425
10	1 080–1 097	1 092
20	650–738	721
30	420–546	465
40	143–158	152
50	67–76	72
60	43–57	52

Data analysis shows the adequacy of the numerical calculation method. The corresponding deviation is due to the flow turbulization caused by the influence of the car body on the aerodynamics of the flow.

The source of positive aeroions on the street is primarily people, cars. During calculations, a complex of factors was taken into account, which had been overlooked in scientific publications: aeroion emission from cars; aeroion emission from humans; the influence of various obstacles in the street on the aeroionic mode formation; the influence of the uneven wind velocity field on the formation of aeroionic mode; the influence of the uneven field of atmospheric diffusion on the formation of the aeroionic mode; modeling of aeroions dispersion in a three-dimensional formulation (3D modeling).

Taking into account the listed factors extremely complicates the solving of these problems:

The task solution is based on three stages:

1. Modeling the formation of a field of concentration of positive, negative aeroions and dust under the influence of wind and atmospheric diffusion.
2. Modeling the transport of aeroions under the action of an electric field.
3. Change the field of concentration of aeroion, dust due to their interaction.

The developed method of forecasting was used to solve the task of estimating the level of pollution of working areas in the open air in the presence of a source of emissions: positive aeroions – emissions from vehicles and people; dust – traffic; sources of negative aeroions – an ionizer installed in the working zone and the screen (fence), which changes the aerodynamics of the aeroions and dust.



Fig. 1. Modeling area (Google Earth Image, 2019)
Dnipro Oil Extraction Plant:
1 – cargo scales

As a research object, the Dnipro Oil Extraction Plant was chosen, namely, the territory where the cargo scales (Fig. 1) operate, where the lorries with seeds arrive. This area is a source of dust, positive aeroions, and workers responsible for unloading cars are constantly under the influence of these negative factors.

Scheme of the calculated area is presented in Fig. 2

There are the results of the computational experiment for calculating the field of positive, negative aeroion and dust concentration in the working area of the industrial site (Fig. 3, Fig. 5, Fig. 7). The speed of the air flow was set at 5 m/s, the size of the calculated area was 8x4 m, the intensity of the sources of aeroions was 1000 ions/cm³. Fig. 4,

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Fig. 6, Fig. 8 show the percentage distribution of negative, positive aeroions and dust concentrations in the working area at the height of 1.7 m.

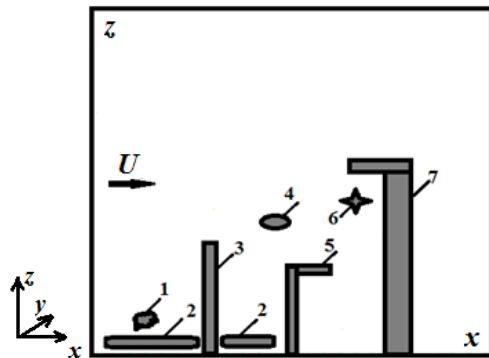


Fig. 2. Scheme of the calculated area:
1 – emission source (car), 2 – emission source (dust),
3 – screen, 4 – source of positive aeroions,
5 – working area,
6 – source of negative aeroions (ionizer),
7 – temporary building

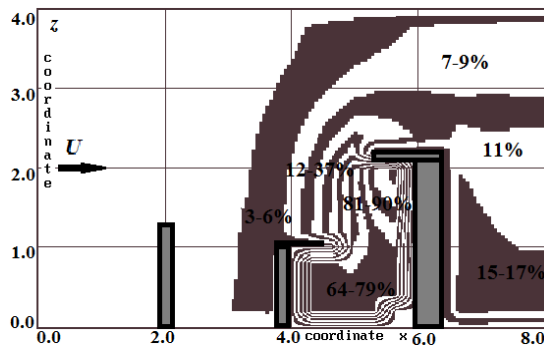


Fig. 3. Distribution of negative aeroions concentration, intersection $y=4$ m

In Fig. 3 it is evident that at the distance of 3 m from the beginning of the calculated area there are no negative aeroions, since there is no source of emission on this site, and on another section a complex picture of the distribution, which is caused by the movement of the air flow and the action of atmospheric diffusion, is observed.

The value of the concentration at the height $H = 1.7$ m slowly increases under the influence of the emission source and diffusion (Fig. 4).

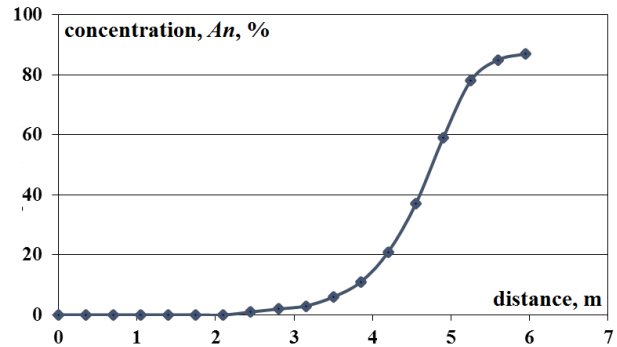


Fig. 4. Distribution of the concentration of negative aeroions at the height $H = 1.7$ m, intersection $y=4$ m

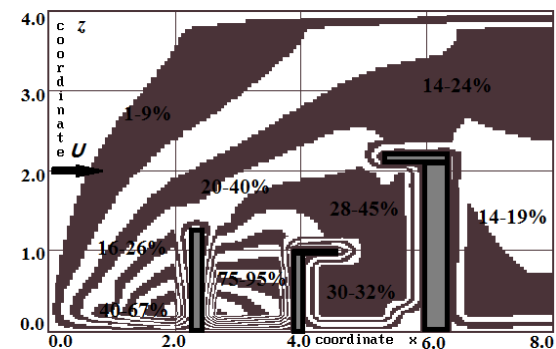


Fig. 5. Distribution of dust concentration, intersection $y=4$ m

In Fig. 5 it is evident that the entire research area is filled with dust, due to its intensive allocation on two sites: before the screen – the emission of dust from cars; from the screen to the location of the scales – the work area of the workers. The dust is driven by wind flow and gets into the working area in the open ground. The maximum permissible concentration is $MPC_{a.d.}=0.15$ mg/m³, so the dust concentration in this zone exceeds the $MPC_{a.d.}$ by 20%.

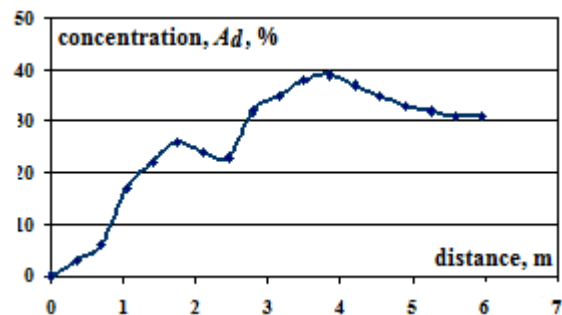


Fig. 6. Distribution of dust concentration at the height $H = 1.7$ m, intersection $y=4$ m

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

The dust concentration at the height of $H = 1.7$ m slowly increases under the influence of the emission source (motor vehicles), then it is reduced due to the screen action and decreases at insignificant distance, but under the influence of the source of emissions (workers) increases again and decreases due to changing the flow direction near the awning of the temporary building and diffusion (Fig. 6).

Fig. 7 shows the distribution of positive aeroions.

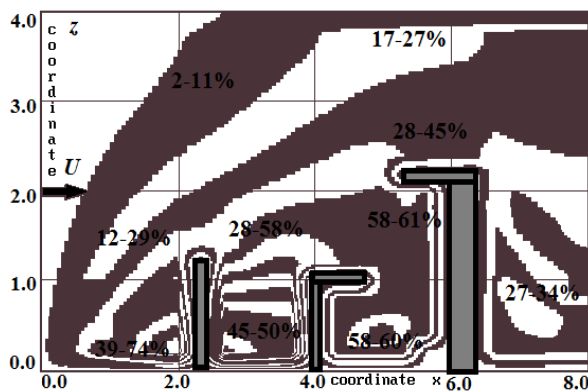


Fig. 7. Distribution of the concentration of positive aeroions, intersection $y=4$ m

Apparently, in the working zone there is a dynamics of growth of positive aeroions, which is caused by the transport of positive aeroions from vehicles (source of emissions – cars) and the emission of positive aeroions from people in the working zone, that is, the interaction of sources of aeroion emissions takes place.

As the dust concentration values, the concentration of positive aeroions slowly increases at the height $H = 1.7$ m under the action of the emission source of positive aeroions (vehicles), then it is reduced by the screen action and decreases at insignificant distance, but under the influence of the source of emissions (workers) increases again and decreases due to changing the flow direction near the awning of the temporary building and diffusion (Fig. 8).

The optimal level of positive aeroions $1500-3000$ ions/cm³, the maximum allowable level is 50000 ions/cm³, in the working area is observed exceeding the permissible level by 10%.

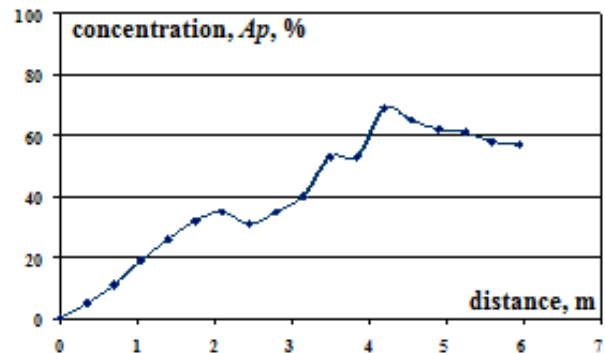


Fig. 8. Distribution of the concentration of positive aeroions at the height of $H=1.7$ m, intersection $y=4$ m

Originality and practical value

1. The method of aeroionic mode forecasting in working zones is developed, which is based on three-dimensional modeling of the distribution of negative, positive ions and dust under the influence of wind and diffusion.

2. The peculiarity of the proposed method is the possibility of forecasting the aeroionic mode, taking into account almost all physical factors that significantly affect the formation of concentration fields of aeroions in working areas at industrial sites.

3. The proposed method of forecasting was used to solve the problem of aeroion assessment in open areas in industrial site in the presence of emission sources: positive aeroions – emissions of vehicles and breathing of people; dust – the movement of workers and vehicles; sources of negative aeroions – ionizer installed in the working zone and the screen, which changes the aerodynamics of aeroions and dust.

4. The regularities of the change in the concentration of aeroions and dust at the height of 1.7 m are established, which corresponds to the position of the respiratory organs of the workers.

5. The developed mathematical method of forecasting can be used to estimate the concentration of aeroions of different polarity and dust.

6. The method is implemented in the form of application program for the calculation of aeroionic mode in the working areas in the open field of industrial sites.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Findings

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

- the mathematical method of numerical calculation of the concentration of positive, negative aeroions and dust is proposed;
- the method is not tied to a specific industrial site, it allows estimating the value of the concentration of aeroions both locally and in the entire calculated area;
- a physical experiment was conducted demon-

strating the adequacy of the numerical calculation method;

– the results of calculations are useful in terms of ensuring acceptable working conditions in the workplaces of industrial sites, in creating new jobs and reengineering the existing ones.

The prospect of development of this direction is to improve the established method for assessing the parameters of well-being of workers in outdoor areas of industrial sites in the established aeroionic mode.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беликов, А. С. Некоторые аспекты оптимизации исследования условий труда по микроклимату в промышленной индустрии / А. С. Беликов, С. Ю. Рагимов, В. Д. Акиншин // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування : зб. наук. пр. / ДВНЗ «Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури». – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 52, ч. 2. – С. 3–9.
2. Беляев, Н. Н. Моделирование аэроионного режима в рабочих зонах в условиях искусственной ионизации воздуха / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 39–47. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60947>
3. Водяник, А. О. Методи визначення концентрацій аероіонів та вмісту пилу у повітрі виробничих приміщень // А. О. Водяник, Т. В. Віднічук // Містобудування та територіальне планування : наук.-тех. зб. – Київ, 2013. – Вип. 50. – С. 77–81.
4. Глива, В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень / В. А. Глива // Проблеми охорони праці в Україні : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – Вип. 20. – С. 58–65.
5. Запорожець, О. І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник Національного авіаційного університету. – 2011. – Т. 47, № 2. – С. 120–124. doi: <http://dx.doi.org/10.18372/2306-1472.47.24>
6. Строкань, О. В. Програмно-інформаційна система оптимізації мікроклімату у виробничому приміщенні / О. В. Строкань // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків, 2014. – № 48 (1090). – С. 91–96.
7. Толкунов, І. О. Дослідження шляхів удосконалення аероіонного режиму робочого середовища приміщень спеціального призначення / І. О. Толкунов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 1 (18). – С. 197–201.
8. Черный, К. А. Методологический подход к применению коронных аэроионизаторов при проведении коррекции аэроионного состава воздуха помещений / К. А. Черный // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 6 (32). – С. 48–53.
9. Черный, К. А. Современное представление о природе аэроионов и их классификация / К. А. Черный // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 7 (127). – С. 15–20.
10. 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.
11. Biliaiev, M. M. Complex of numerical models for computation of air ion concentration in premises / M. M. Biliaiev, S. G. Tsygankova // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 16–24. doi: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2016/67281>
12. Efficiency of ionizers in removing airborne particles in indoor environments / B. Pushpawela, R. Jayaratne, A. Nguy, L. Morawska // Journal of Electrostatics. – 2017. – Vol. 90. – P. 79–84. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2017.10.002>
13. Low-resistance dual-purpose air filter releasing negative ions and effectively capturing PM2.5 / X. Zhao, Y. Li, T. Hua, P. Jiang, X. Yin, J. Yu, B. Ding // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 13. – P. 12054–12063. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b00351>

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

14. Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow / P. Zhou, Y. Yang, G. Huang, A. C. K. Lai // Building and Environment. – 2018. – Vol. 127. – P. 204–210. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.006>
15. Sidorov, A. V. The technique of small air ions concentration measurement at the PC operator working place / A. V. Sidorov // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 1. – С. 36–41.
16. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach / A. Jurelionis, L. Gagytė, T. Prasauskas [et al.] // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 86. – P. 305–313. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.014>

Т. І. РУСАКОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, вул. Казакова, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

МЕТОД ПРОГНОЗУ ПАРАМЕТРІВ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ

Мета. Наукова робота має на меті розробку нового методу прогнозу аероіонного режиму в робочих зонах на промислових майданчиках із урахуванням іонізуювальних джерел і навколишніх перешкод. **Методика.** Для знаходження концентрації позитивних аероіонів, пилу й негативних аероіонів використано 3D-рівняння масопереносу, що враховує швидкість рекомбінації іонів, які мають різну полярність, і швидкість рекомбінації іонів із частинками пилу. Чисельне розв'язання ґрунтується на інтегруванні рівнянь масопереносу за допомогою кінцево-різницевого методу, що виявляється стійким для будь-якого кроку за часом. Для визначення компонентів вектора швидкості повітряного потоку використано тривимірну модель потенційної течії, де моделювальним рівнянням виступає рівняння Лапласа для потенціалу швидкості. **Результати.** Розроблено математичний метод чисельного розрахунку концентрації позитивних, негативних аероіонів і пилу. Особливістю методу є можливість прогнозу аероіонного режиму з урахуванням практично всіх фізичних факторів, що суттєво впливають на формування концентраційних полів аероіонів у робочих зонах на промислових майданчиках. Метод не прив'язаний до конкретного промислового майданчика, що дозволяє оцінити значення концентрації аероіонів як локально, так і в усій розрахунковій зоні. **Наукова новизна.** Розроблено метод прогнозу аероіонного режиму в робочих зонах, який базується на тривимірному моделюванні розповсюдження негативних, позитивних аероіонів і пилу під дією вітру й дифузії, що дозволяє отримувати результати в кожній точці простору або в конкретному поперечному перерізі. **Практична значимість.** Запропонований метод прогнозу було використано для розв'язання задачі з оцінки аероіонного режиму в робочих зонах на відкритій місцевості промислового майданчика Дніпровського олійно-екстракційного заводу за наявності джерел емісії: позитивних аероіонів під час роботи автотранспорту й дихання працівників; пилу під час руху працівників та автотранспорту; негативних аероіонів іонізатора, встановленого в робочій зоні. Виявлено закономірності зміни концентрації аероіонів різної полярності й пилу на висоті 1,7 м, що відповідає розташуванню органів дихання працівників. Кількісні результати є необхідними для оцінки допустимих умов праці на робочих місцях промислових майданчиків підприємств і під час створення нових робочих місць і реінжинірингу наявних.

Ключові слова: іонізація повітря; джерела емісії іонів; чисельний метод; промисловий майданчик; концентрація аероіонів

Т. И. РУСАКОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, эл. почта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

МЕТОД ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В РАБОЧИХ ЗОНАХ НА ОТКРЫТОЙ МЕСТНОСТИ

Цель. Научная работа посвящена разработке нового метода прогноза аэроионного режима в рабочих зонах на промышленных площадках с учетом ионизирующих источников и окружающих препятствий. **Методика.** Для нахождения концентрации положительных аэроионов, пыли и отрицательных аэроионов использованы 3D-уравнения массопереноса, учитывающие скорость рекомбинации ионов, имеющих разную полярность, и скорость рекомбинации ионов с частицами пыли. Численное решение основывается на интегрировании уравнений массопереноса с помощью конечно-разностного метода, который оказывается устойчивым для любого шага по времени. Для определения компонент вектора скорости воздушного потока использована трехмерная модель потенциального течения, где моделирующим уравнением выступает уравнение Лапласа для потенциала скорости. **Результаты.** Разработан математический метод численного расчета концентрации положительных, отрицательных аэроионов и пыли. Особенностью метода является возможность прогноза аэроионного режима с учетом практически всех физических факторов, существенно влияющих на формирование концентрационных полей аэроионов в рабочих зонах на промышленных площадках. Метод не привязан к конкретной промышленной площадке, что позволяет оценить значение концентрации аэроионов как локально, так и во всей расчетной области. **Научная новизна.** Разработан метод прогноза аэроионного режима в рабочих зонах, основанный на трехмерном моделировании распространения отрицательных, положительных аэроионов и пыли под действием ветра и диффузии, что позволяет получать результаты в каждой точке пространства или в конкретном поперечном сечении. **Практическая значимость.** Предложенный метод прогноза был использован для решения задачи по оценке аэроионного режима в рабочих зонах на открытой местности промышленной площадки Днепропетровского маслоэкстракционного завода при наличии источников эмиссии: положительных аэроионов во время работы автотранспорта и дыхания работников; пыли во время движения работников и автотранспорта; отрицательных аэроионов ионизатора, установленного в рабочей зоне. Выявлены закономерности изменения концентрации аэроионов различной полярности и пыли на высоте 1,7 м, что соответствует расположению органов дыхания работников. Количественные результаты необходимы при оценке допустимых условий труда на рабочих местах промышленных площадок предприятий и при создании новых рабочих мест и реинжиниринге существующих.

Ключевые слова: ионизация воздуха; источники эмиссии ионов; численный метод; промышленная площадка; концентрация аэроионов

REFERENCES

1. Belikov, A. S., Ragimov, S. Y., & Akinshin, V. D. (2010). Some aspects of the optimization of the study of working conditions on the microclimate in the industrial industry. *Construction, material science, mechanical engineering*, 52, 3-9. (in Russian)
2. Biliaiev, M. M., & Tsygankova, S. G. (2016). Modeling of the aeroionic mode in working zones in the conditions of artificial ionization of air. *Science and Transport Progress*, 1(61), 39-47. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60947> (in Russian)
3. Vodanyuk, A. O., & Vidnichuk, T. V. (2013). Metody vyznachennia kontsentratsii aeroioniv ta vmistu pyly u povitri vyrobnychkyh prymishchen. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 50, 77-81. (in Ukrainian)
4. Hlyva, V. A. (2011). Doslidzhennia vplyvu mikroklimatichnykh parametriv povitroobminu na aeroionnyi sklad povitria robochykh prymishchen. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*, 20, 58-65. (in Ukrainian)
5. Zaporozhets, O. I., Hlyva, V. A., & Sidorov, O. V. (2011). The Principles of Modeling of Dynamics of Ionic Composition of Indoor Air. *Proceedings of the National Aviation University*, 47(2), 120-124. doi: <http://dx.doi.org/10.18372/2306-1472.47.24> (in Ukrainian)
6. Stokan, O. V. (2014). Prohramno-informatsiina systema optymizatsii mikroklimatu u vyrobnychomu prymishchenni. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*, 48(1090), 91-96. (in Ukrainian)
7. Tolkunov, I. O. (2015). Study Ways to Improve the Air Ion Mode in the Work Environment Facilities for Special Purposes. *Science and technology of the air force of Ukraine*, 1(18), 197-201. (in Ukrainian)
8. Chernyy, K. A. (2012). Metodologicheskii podkhod k primeneniyu koronnykh aeroionizatorov pri provedenii korrektsii aeroionnogo sostava vozdukha pomeshcheniy. *Magazine of Civil Engineering*, 6(32), 48-53. (in Russian)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

9. Chernyy, K. A. (2011). The up-to-date knowledge on the air ions nature and their classification. *Bezopasnost' Zhiznedeatel'nosti*, 7(127), 15-20. (in Russian)
10. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
11. Biliaiev, M. M., & Tsygankova, S. G. (2016). Complex of numerical models for computation of air ion concentration in premises. *Science and Transport Progress*, 2(62), 16-24. doi: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2016/67281> (in English)
12. Pushpawela, B., Jayaratne, R., Nguy, A., & Morawska, L. (2017). Efficiency of ionizers in removing airborne particles in indoor environments. *Journal of Electrostatics*, 90, 79-84. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2017.10.002> (in English)
13. Zhao, X., Li, Y., Hua, T., Jiang, P., Yin, X., Yu, J., & Ding, B. (2017). Low-Resistance Dual-Purpose Air Filter Releasing Negative Ions and Effectively Capturing PM2.5. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(13), 12054-12063. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b00351> (in English)
14. Zhou, P., Yang, Y., Huang, G., & Lai, A. C. K. (2018). Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow. *Building and Environment*, 127, 204-210. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.006> (in English)
15. Sidorov, A. V. (2014). The technique of small air ions concentration measurement at the PC operator working place. *Engineering industry and life safety*, 1, 36-41. (in English)
16. Jurelionis, A., Gagytė, L., Prasauskas, T., Čiužas, D., Krugly, E., Šeduikytė, L., & Martuzevičius, D. (2015). The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach. *Energy and Buildings*, 86, 305-313. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.014> (in English)

Received: Jan. 16, 2019

Accepted: May 15, 2019

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.6.022:005.89

О. Л. ДРОЖЖИН^{1*}, Ю. О. КОСКІНА^{2*}

^{1*}Каф. «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень», Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (050) 415 36 76, ел. пошта alexey.drozhzhyn@ukr.net, ORCID 0000-0002-9695-9296

^{2*}Каф. «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень», Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (067) 557 76 46, ел. пошта yuliia.koskina@ukr.net, ORCID 0000-0002-3164-6504

ПОЛІСЕМІЧНІСТЬ ПОНЯТЬ «ДЕМЕРЕДЖ» І «ДЕТЕНШЕН» У ПРАКТИЦІ ЛІНІЙНОГО Й ТРАМПОВОГО СУДНОПЛАВСТВА

Мета. Це дослідження спрямоване на систематизацію змісту понять «демередж» і «детеншен», які застосовують у практиці морських перевезень. Ці поняття наразі характеризуються різним тлумаченням відповідно до їх використання в лінійній і трамповій формах судноплавства, що потребує необхідності виконання компаративного аналізу. **Методика.** Для зазначеного аналізу використано джерела інформації, які дозволяють на підставі сучасних наукових методів визначити специфіку понять «демередж» і «детеншен» як на науковому рівні, так і на рівні практичної реалізації. **Результати.** Автори довели, що попри синонімічність поняття «демередж» і «детеншен» мають принципові відмінності відповідно до використання їх у договорах перевезення вантажів суднами, роботу яких організовано у формі трампового й лінійного судноплавства. Враховуючи специфічні умови організаційних форм судноплавства, терміни, змістове тлумачення яких є об'єктом дослідження, мають різний об'єкт стягнення, порядок обґрунтування величини відповідних ставок і порядок розрахунку загальних сум. **Наукова новизна.** Автори вперше провели дослідження в контексті двох форм організації роботи морського транспорту (трампової й лінійної) і встановили семантичні особливості морських термінів «демередж» і «детеншен». **Практична значимість.** Комерційна робота транспортних підприємств, зокрема судноплавних, тісно пов'язана з технічними, технологічними, організаційно-правовими, економічними і навіть лінгвістичними проблемами. Останній аспект стосується точності розуміння термінів сторонами договорів на перевезення вантажів – судноплавними компаніями (лінійної й трампової організації роботи) і контрагентами-вантажовласниками, – оскільки зі значення цих термінів впливає відповідальність матеріального характеру. Чітке тлумачення понять є вирішальним для запобігання можливих суперечок щодо відповідних виплат. Адже невизначеність, наявна в наукових публікаціях та інформаційних джерелах практичного характеру, призводить до вільної інтерпретації й підміни аналізованих понять один одним без чіткого розподілу відповідальності сторін за різних форм судноплавства.

Ключові слова: трампове судноплавство; лінійне судноплавство; демередж; детеншен; сталійний час; чартер-партія; коносамент

Вступ

Історично склалося, що більшість термінів морського судноплавства, які стосуються комерційної експлуатації торговельного флоту, є запозиченими з англійською мови. Перші спроби їх тлумачення (зокрема «лейтайму» і «демереджу») належать, як зазначено в [14], до

кінця 1830-х років. Звісно, нові технології, які визначили різноманітність організаційних та управлінських форм судноплавства, поступово змінювали й зміст ключових понять торговельного судноплавства. Таким чином, морські терміни зазнали історичних трансформацій їх змісту. Важливою є фіксація сингулярних і за-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

гальних рис та характеру їх відмінностей на сучасному етапі розвитку й комерційної практики торговельного судноплавства.

Мета

З урахуванням зазначеного метою статті є компаративний аналіз понять «демередж» і «детеншен» у практиці лінійної й трампової форм організації роботи торговельного судноплавства.

Методика

У ході дослідження було використано загальнологічні методи аналізу й синтезу, узагальнення й аналогії, абстрагування й конкретизації.

Результати

Слід зазначити, що в юриспруденції сьогодні немає однозначного розуміння змісту понять «демередж» і «детеншен». В англійському праві «демередж» визначають як заздалегідь оцінені збитки за порушення умов договору про сталійний час, які фрахтувальник судна має компенсувати його власнику в разі виникнення ситуацій, пов'язаних із затримкою судна під вантажними роботами понад обумовлений у договорі час. Як механізм компенсування збитків судовласнику за затримку судна трактують демередж і в Бельгії. Такої самої позиції дотримуються і юристи скандинавських країн, Німеччини. Французькі судові органи, розглядаючи відповідні справи, трактують демередж як додатковий (до основного) фрахт. Немає єдиної позиції у правознавців Італії, адже за різних обставин демередж розуміють і як компенсацію особливого характеру, і як додатковий фрахт. Під час розгляду суперечок щодо необхідності сплати демереджу судові органи США вважають його фрахтом, сутність якого полягає в компенсації витрат, що викликані затримкою судна після закінчення сталії [7]. Узагальнюючи викладене, слід зазначити, що в наведених підходах здебільшого розуміють демередж як виплату за порушення умов договору між судовласником і фрахтувальником і не зважають на можливість трактування такої виплати або як компенсації витрат, або як додаткового фрахту.

Зазначені невідповідності в тлумаченні демереджу привертають увагу не лише з юридичного боку – вони мають важливе значення і в комерційній практиці експлуатації суден, що підтверджує значна кількість заходів практичного характеру, які проводять іноземні профільні установи [9, 10, 15].

Специфічні особливості експлуатації суден (технічні, технологічні, комерційні) у лінійній і трамповій формах судноплавства досить детально викладено в спеціальній літературі [4, 8, 12], що дозволяє авторам цієї статті перейти до безпосереднього аналізу тлумачення понять «демередж» і «детеншен» у трамповій і лінійній формах судноплавства без обтяжливого порівняння останніх.

Отже, поняття «демередж» і «детеншен» регулюють взаємовідносини судовласника й фрахтувальника в частині тривалості часу перебування судна в портах виконання вантажних робіт. У вигляді відповідних умов їх зафіксовано в договорах, що регулюють відносини судовласника й фрахтувальника (за трампового судноплавства – чартер-партія, за лінійного – лінійний коносамент).

Умова про демередж є в будь-якій чартер-партії – затримка судна під вантажними роботами однозначно призводить до збільшення витрат судовласника порівняно з тією їх величиною, яку він «закладав» у ставку фрахту під час проведення перемовин та укладання угоди. Зрозуміло, що в разі виникнення відповідної ситуації не з його провини він має право отримати демередж – незалежно від того, як трактувати його в юридичному сенсі (як додатковий фрахт чи як компенсацію непередбачених витрат). Умову про необхідність сплати демереджу в різних проформах формулюють у різний спосіб. Наразі загальна ідея зводиться до того, що за невиконання фрахтувальником вантажних робіт у встановлений у чартер-партії період (якщо після закінчення погодженої сталії вантажні роботи не закінчено) за кожен день подальшого перебування судна під вантажною обробкою фрахтувальник сплачує на користь судовласника грошову суму за погодженою ставкою демереджу. Після закінчення сталійного часу починається так званий контрсталійний час, коли за кожен день (або пропорційно частині доби) перебування судна під вантажними роботами власне і спла-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

чують демередж. Сплата демереджу за кожен день контрстального часу є принциповою позицією і не залежить від того, на яких умовах погоджено власне сталійний час і на яких умовах продовжуються вантажні роботи. У трамповому суднопластві існує навіть приказка «once on demurrage – always on demurrage»: судно, яке «вийшло на демередж», має отримувати відповідну платню до фактичного закінчення вантажних робіт. Наразі в деяких чартер-партіях перебування судна на контрстальному часі з відповідною сплатою демереджу обмежено певною кількістю днів. Зокрема, універсальна проформа чартер-партії «Дженкон» обмежує контрстальний час до 10 діб; у проформі чартер-партії на перевезення зернових «Зернокон» період перебування судна на контрсталі зі сплатою демереджу вказано 15-добовим інтервалом [6]. Якщо після закінчення відповідного часу вантажні роботи не закінчено, ставка демереджу, яку сплачує фрахтувальник на користь судновласника, збільшується (зазвичай – удвічі): судно виходить на так званий понадконтрстальний час зі сплатою за кожен добу простою (або пропорційно) детеншену.

Перебування судна на понадконтрстальному часі завжди сплачують за підвищеною ставкою, адже тут йдеться про відшкодування не лише непередбачуваних збитків у зв'язку із затримкою судна під вантажними роботами, але й про компенсацію так званого втраченого прибутку.

Розмір ставки демереджу є предметом обговорення між сторонами під час проведення перемовин. Якщо сторони дійшли згоди щодо його величини, її фіксують у договорі чартер-партії, за яким подальший торг (під час рейсу чи виникнення відповідних обставин щодо його сплати) вже є неможливим. Величина ставки демереджу залежить насамперед від типу й розміру судна й має певний (опосередкований через умови про сталійний час і вірогідність затримок судна в портах під вантажними роботами) вплив на величину ставки фрахту [5, 13].

У лінійному суднопластві фрахтувальники не несуть відповідальності за використання судна понад установлений час, але на них покладено відповідальність не перевищувати час, який встановлює перевізник (Carrier) в вигляді так званого вільного часу, «Free Time» (FT).

Призначення вільного часу не є уніфікованим. Деякі лінійні перевізники (Maersk Line) використовують комбіновану систему стягнення демереджу і детеншену, «Combined Demurrage and Detention» (CDD) а деякі – лише демереджу.

Maersk Line визначає FT наступним чином: «вільний час» – це період, погоджений між Перевізником і Комерсантом, за яким Комерсант не сплачує демередж, детеншен, комбінований демередж і зберігання (за наявності) [17].

Система нарахування CDD має окремий FT відповідно до безоплатного перебування контейнерного обладнання в терміналі, у порту чи депо (FT на демередж), і поза терміналом (FT на детеншен). Таким чином, власник контейнерного обладнання цим грошовим стягненням стимулює вантажовласника якомога пришвидшити операції завантаження/розвантаження в/з контейнера на території терміналу і на складах вантажовідправника чи вантажоотримувача. Датою закінчення демереджу й детеншену, за CDD, вважають відповідно дату виїзду з порту й дату повернення контейнерного обладнання порожнім у місце, вказане морським лінійним перевізником.

З урахуванням вищезазначеного, у лінійних контейнерних перевезеннях можна узагальнити основні поняття, що представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні визначення стосовно нарахування демереджу й детеншену в контейнерних перевезеннях

Table 1

Basic definitions for accrual of demurrage and detention in container transportation

Термін	Комбінація (CDD)
Демередж – ставка, яку сплачує комерсант за використання контейнера в межах контейнерного терміналу після закінчення вільного часу	Об'єднаний демередж і детеншен – ставка, яку сплачує комерсант за використання контейнера поза межами вільного часу, коли демередж і детеншен об'єднані в єдиний FT
Детеншен – ставка, яку сплачує комерсант за використання контейнера поза межами терміналу або депо після закінчення вільного часу	

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Продовження таблиці 1

Continuation of Table 1

Облік часу демереджу	
Імпорт	Експорт
період, який починається з дати вивантаження контейнера із судна до виходу повного контейнера з терміналу	період від в'їзду повного контейнера на термінал до моменту його завантаження на борт судна
Облік часу детеншену	
Імпорт	Експорт
період від виходу повного контейнера з терміналу до його повернення порожнім у визначений пункт	період від виходу порожнього контейнера з терміналу (депо) до повернення повного контейнера на термінал (депо)
Супутні терміни	
Зберігання (storage charge)	Фрі-тайм (FT)
платня (не обмежується тільки використанням причальної площі), яку стягують оператори терміналів за контейнери, що зберігаються на площадці; її звичайно оператори терміналу переадресовують на судноплавну лінію	час безоплатного користування контейнером, який власник контейнера пропонує комерсантаві; перевищення цього часу тягне за собою сплату демереджу й детеншену

Кількість діб FT перевізники встановлюють стандартною відповідно до кожного заходження в порт і до напрямку (експорт/імпорт). Спеціальні умови FT встановлюють для перевізників у випадках обґрунтованості таких запитів, наприклад, подальше наземне транспортування поза країною порту призначення [3]. Звісно, такі спеціальні умови FT мають бути погоджені сторонами ще до перевезення відповідними позначеннями в лінійному коносаменті. Цю необхідність пояснює п. «Carrier's Tariff» на зворотній стороні лінійного коносаменту, який має ознаки договору морського перевезення [11].

Більшість перевізників використовують застереження на кшталт «In the case of inconsistency between this bill of lading and the applicable Tariff, the bill of lading shall prevail», яке надає умовам коносаменту перевагу.

Ставки демереджу й детеншену призначають відповідно до порту (конкретного терміналу), контейнерного обладнання й напрямку перевезень за прогресивною шкалою (рис. 1, 2).

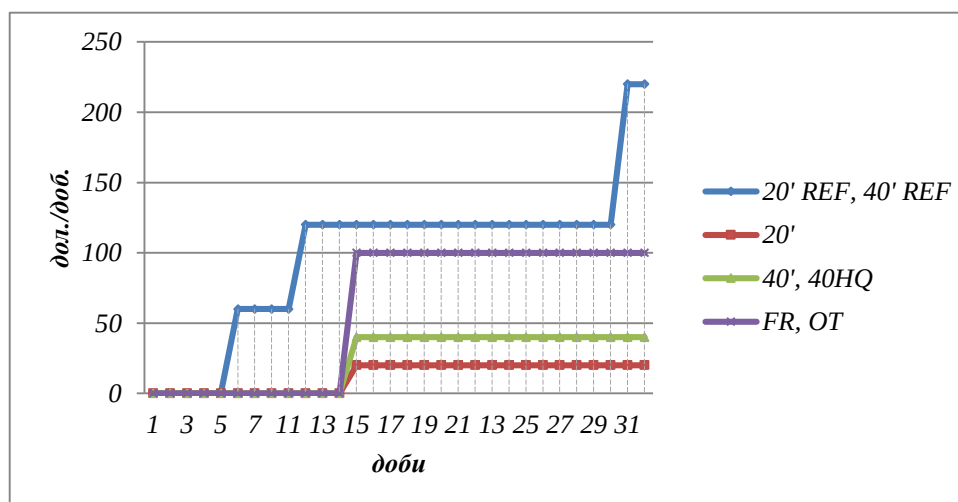


Рис. 1. Шкала нарахування імпортного демереджу морським лінійним перевізником Maersk Line на терміналах в українських портах

Fig. 1. Scale of import of demurrage marine linear Maersk Line carrier at terminals in Ukrainian ports

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

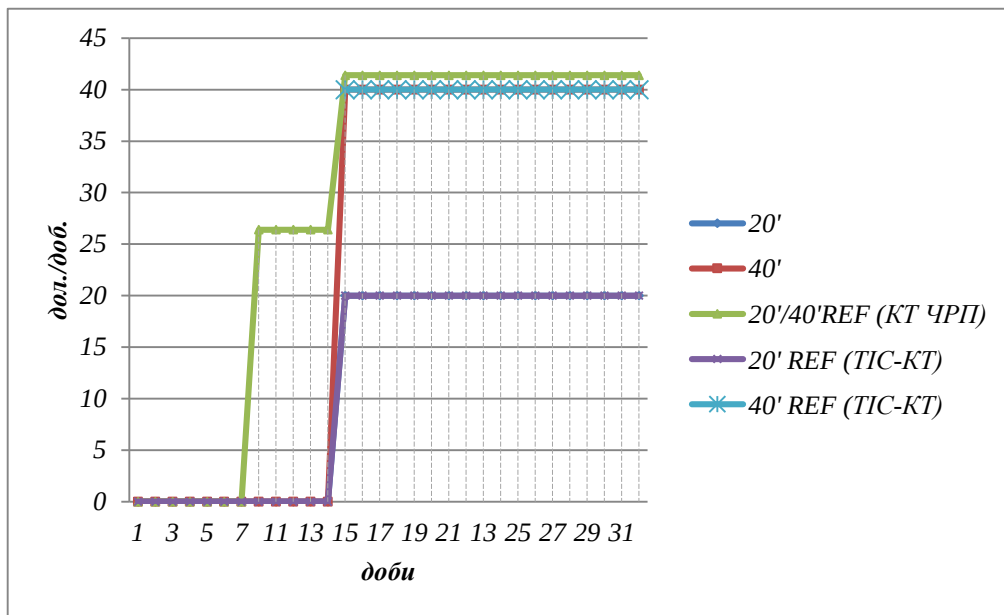


Рис. 2. Шкала нарахування експортного демереджу морським лінійним перевізником Maersk Line на терміналах (КТ ЧРП – контейнерний термінал Чорноморського рибного порту і TIC-KT – термінал в порту Південний)

Fig. 2. Scale of export demurrage accrued by Maersk Line maritime carrier at terminals (CT ChFP – Container Terminal of Chornomorsk Fishing Port and TIS-CT – Terminal in the South Port)

Як показано на рис. 1, найменший час FT в більшості випадків припадає на рефрижераторне контейнерне обладнання – 5 діб для українських терміналів в імпорті (рис. 1) і 7-14 діб для експорту (рис.2). Причому, якщо в експортному випадку, починаючи з 15-ої доби для 20'REF ставка становить 41,4 дол. в Чорноморську, то для терміналу TIC в Південному – вдвічі менше – 20 дол. Ця обставина пояснюється відносним балансом рефрижераторних контейнеропотоків в імпорті і експорті в Південному.

Компанії, що використовують лише нарахування демереджу, «Demurrage only» (DO) розрахунковим періодом вважають:

– 00:01 год дати вивантаження судна до поточної дати повернення контейнера порожнім за вирахуванням діб FT;

– 00:01 год календарного дня, коли порожній контейнер прийнятий у морського перевізника в його депо порожнім, і до дати прибуття судна під завантаження.

На відміну від лінійних перевезень, у трамповій формі судноплавства, де відносини сторін мають разовий характер і регулюються укладеною на кожне окреме перевезення чартер-партією, ставки демереджу є предметом обговорення й домовленостей. При цьому судовласник орієнтується на необхідність компенсації добових витрат на утримання судна (так званих постійних витрат). Наразі суттєве значення має і ситуація в зарубіжних портах, передбачити яку в момент укладання угоди неможливо: у періоди пікових відвантажень певних товарів спостерігаються скупчення суден [1, 2, 16]. Зрозуміло, це ще не означає, що судно буде затримане під вантажною обробкою, однак у певному сенсі підвищує вірогідність такої затримки.

Основні відмінності поняття «демередж» відповідно до форми судноплавства зазначено в табл. 2.

Таблиця 2

Основні відмінності поняття «демередж» відповідно до форми організації судноплавства

Table 2

The main variances of the term “demurrage” by the shipping organization form

Демередж					
Форма	Об'єкт, відповідно до якого стягується платня	Початок відрахування в часі	Залежить від		
Лінійна	Контейнерне обладнання, що належить відправнику (COS)	Відповідно до дати закінчення ФТ	Напрямку перевезення (імпорт/експорт)	Типу обладнання	Порту відправлення/призначення
Трампова	Судно, зафрахтоване на рейс для перевезення вантажу	Закінчення обумовленого в чартер-партії сталійного часу	—	Розміру й типу судна	Вірогідності затримки судна під вантажними роботами (наприклад, через скупчення суден у портах)

Наукова новизна та практична значимість

Уперше виконано компаративний аналіз ключових термінів торговельного судноплавства, які використовують у практичній діяльності підприємств як трампової, так і лінійної форм організації роботи флоту, – демередж і детеншен. Результати дослідження є передусім важливими для однієї зі сторін угоди на перевезення вантажів морськими суднами – вантажовласників або їх представників, які уповноважені першими на організацію доставки вантажів із залученням морського транспорту. Загалом результати дослідження мають практичну значимість для організацій і підприємств, які опікуються операціями, пов'язаними з морськими перевезеннями вантажів.

Висновки

Синонімічність понять «демередж» і «детеншен», які вживаються як у лінійній, так і в трамповій формі роботи суден із перевезень вантажів, призводить до певних непорозумінь між сторонами угод, зокрема в частині відповідальності фрахтувальника, який вдається до послуг лінійних або трампових перевізників. Чітке розмежування змісту цих термінів базується на специфічних умовах роботи суден (і виконання ними перевезень вантажів) у різних формах судноплавства. Зокрема, різними є база й порядок нарахування таких грошових виплат; певні відмінності є також і у факторах, якими визначають величини ставок демереджу й детеншену.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Войниченко, В. В. Волны мирового фрахтового рынка [Електронний ресурс] / В. В. Войниченко. – Режим доступу: <https://ports.com.ua/articles/archive/volny-mirovogo-frakhtovogo-rynka> – Назва з екрана. – Перевірено : 11.05.2019.
2. Войниченко, В. В. Вопреки прогнозам [Електронний ресурс] / В. В. Войниченко. – Режим доступу: <https://ports.com.ua/articles/archive/vopreki-prognozam> – Назва з екрана. – Перевірено : 11.05.2019.
3. Дрожжин, О. Л. Організація роботи суден-контейнеровозів на фідерних лініях : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Дрожжин Олексій Леонідович ; Одес. нац. морськ. ун-т. – Одеса, 2019. – 175 с.
4. Кириллова, Е. В. Формы судоходства : учеб. пособие / Е. В. Кириллова. – Одесса : Изд-во ОНМУ, 2010. – 231 с.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5. Онищенко, С. П. Дослідження впливу умов оферти на успішність укладання фрахтової угоди / С. П. Онищенко, Ю. О. Коскіна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 6, № 3 (78). – С. 25–32. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55738>
6. Проформы чартеров. – Санкт-Петербург : [Б. и.], 1994. – Кн. 1. – 490 с.
7. Юридический справочник по торговому мореплаванию / В. Г. Ермолаев, А. С. Кокин, А. Ф. Луговцев, А. Л. Маковский ; под ред. А. С. Кокина. – Москва : Спарк, 1998. – 560 с.
8. Brodie, P. Commercial Shipping Handbook / P. Brodie. – Routledge : Informa Law, 2016. – 325 p.
9. Certificate in Laytime and Demurrage: Lloyd's Maritime Academy [Електронний ресурс] / Independent. – Режим доступу: <https://u.to/poFwFQ> – Назва з екрана. – Перевірено : 20.04.2019.
10. Laytime & Demurrage Masterclass [Електронний ресурс] / BIMCO. – Режим доступу: <https://www.bimco.org/training/descriptors/laytime-and-demurrage-masterclass> – Назва з екрана. – Перевірено : 20.04.2019.
11. Mills, S. Bills of Lading – A Guide to Good Practice / S. Mills. – Newcastle upon Tyne : The North of England P&I Association, 2005. – 141 p.
12. Olesen, T. R. Value creation in the maritime chain of transportation. The role of carriers, ports and third parties in liner and bulk shipping [Електронний ресурс] / T. R. Olesen. – GBS Maritime, 2015. – 39 p. – Режим доступу: https://www.cbs.dk/files/cbs.dk/mapping_report_c_value_creation_1.pdf – Назва з екрана. – Перевірено : 20.05.2019.
13. Onyshchenko, S. P. Estimation of the vessel's arrival at port / S. P. Onyshchenko, Y. A. Koskina // Наука та прогрес транспорту. – 2019. – № 1 (79). – С. 39–50. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/158478>
14. Schofield, J. Laytime and demurrage / J. Schofield. – Routledge : Informa Law, 2016. – 584 p.
15. Ship Chartering, Laytime and Demurrage Masterclass: Resolution of Commercial & Legal Complexities [Електронний ресурс] / EuroMaTech. – Режим доступу: <http://www.euromatech.com/seminars/ship-chartering-laytime-demurrage-masterclass> – Назва з екрана. – Перевірено : 20.05.2019.
16. Ship congestion hits China's ports [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://shipsandports.com.ng/ship-congestion-hits-chinas-ports/> – Назва з екрана. – Перевірено : 13.05.2019.
17. Terms for Detention and Demurrage [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://terms.maerskline.com/d_and_d – Назва з екрана. – Перевірено : 20.04.2019.

А. Л. ДРОЖЖИН^{1*}, Ю. А. КОСКИНА^{2*}

^{1*}Каф. «Експлуатація флоту і технологія морських перевозок», Одеський національний морський університет, ул. Мечникова, 34, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (050) 415 36 76, ел. пошта alexey.drozhhyn@ukr.net, ORCID 0000-0002-9695-9296

^{2*}Каф. «Експлуатація флоту і технологія морських перевозок», Одеський національний морський університет, ул. Мечникова, 34, Одеса, Україна, 65029, тел. +38 (067) 557 76 46, ел. пошта yuliia.koskina@ukr.net, ORCID 0000-0002-3164-6504

ПОЛИСЕМИЧНОСТЬ ПОНЯТИЙ «ДЕМЕРЕДЖ» И «ДЕТЕНШЕН» В ПРАКТИКЕ ЛИНЕЙНОГО И ТРАМПОВОГО СУДОХОДСТВА

Цель. Представленное исследование направлено на систематизацию содержания понятий «демередж» и «детеншен», применяемых в практике морских перевозок. Эти понятия характеризуются различным толкованием при их использовании в линейной и трамповой формах судоходства, что требует необходимости выполнения компаративного анализа. **Методика.** Для указанного анализа использованы источники информации, которые позволяют на основании современных научных методов определить специфику понятий «демередж» и «детеншен» как на научном уровне, так и на уровне практической реализации. **Результаты.** Авторы доказали, что несмотря на синонимичность понятия «демередж» и «детеншен» имеют принципиальные отличия при использовании их в договорах перевозки грузов судами, работу которых организовано в форме трампового и линейного судоходства. Учитывая специфические условия организационных форм судоходства, термины, содержательное толкование которых является объектом исследования, имеют разный объект начисления, порядок обоснования величины соответствующих ставок и порядок расчета общей суммы. **Научная новизна.** Авторы впервые провели исследование в контексте двух форм орга-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

низации морского транспорта (трамповой и линейной) и установили семантические особенности морских терминов «демередж» и «детеншен». **Практическая значимость.** Коммерческая работа транспортных предприятий, в частности судоходных, тесно связана с техническими, технологическими, организационно-правовыми, экономическими и даже лингвистическими проблемами. Последний аспект касается точности понимания терминов сторонами договоров перевозки грузов – судоходными компаниями (линейной и трамповой организации работы) и контрагентами-грузовладельцами, – поскольку из значения этих терминов следует ответственность материального характера. Чёткое толкование понятий является решающим для предотвращения возможных споров относительно соответствующих выплат. Ведь неопределенность, присутствующая в научных публикациях и информационных источниках практического характера, приводит к свободной интерпретации и подмены анализируемых понятий друг другом без четкого распределения ответственности сторон в различных формах судоходства.

Ключевые слова: трамповое судоходство; линейное судоходство; демередж; детеншен; сталийное время; чартер-партия; коносамент

O. L. DROZHYN^{1*}, Y. O. KOSKINA^{2*}

^{1*}Dep. «Fleet Operating and Technologies of Sea Carriages», Odesa National Maritime University, Mechnikova St., 34, Odesa, Ukraine, 65029, tel. +38 (050) 415 36 76, e-mail alexey.drozhzhyn@ukr.net, ORCID 0000-0002-9695-9296

^{2*}Dep. «Fleet Operating and Technologies of Sea Carriages», Odesa National Maritime University, Mechnikova St., 34, Odesa, Ukraine, 65029, tel. +38 (067) 557 76 46, email yuliia.koskina@ukr.net, ORCID 0000-0002-3164-6504

POLYSEMICITY OF THE TERMS «DEMURRAGE» AND «DETENTION» APPLIED IN THE PRACTICE OF LINER AND TRAMP SHIPPING

Purpose. The presented study aims to systematize the definition of the terms «demurrage» and «detention», which are used in the theory and practice of maritime transportations, but are characterized by different meaningful definition when used in liner and tramp shipping, which requires the need for a comparative analysis. **Methodology.** For the stated comparative analysis, the applied information sources allowed to determine the specificity of the terms «demurrage» and «detention» both at the scientific level and at the level of practical implementation. **Findings.** The authors proved that despite their synonymous character, the terms «demurrage» and «detention» have fundamental differences when used in transportation contracts for the vessels of liner and tramp shipping. Taking into account the specific conditions of these organizational forms of shipping, the terms, the meaningful interpretation of which are the object of the study, have a different object of accrual, the procedure for substantiating the value of the corresponding rates and the procedure for calculating the total amount. **Originality.** The authors for the first time carried out a study in the context of two forms of organization of maritime transport (tramp and linear) and established the semantic features of the marine terms «demurrage» and «detention». **Practical value.** The commercial practice of transport companies, in particular shipping ones, is closely connected with technical, technological, organizational, legal, economic and even linguistic issues. The last aspect concerns the role of the accuracy of understanding of the terms by the parties to the transportation contracts concluded by shipping companies (liner and tramp shipping) with counterparties, since it is the responsibility of a material nature that follows from them. Clear interpretation of the terms is crucial to prevent possible disputes regarding the relevant payments. Uncertainty, which is currently present in scientific publications and literary sources of practical nature, leads to a free interpretation and substitution of the analyzed terms with each other without a clear distribution of the parties' responsibility in different forms of shipping.

Keywords: tramp shipping; linear shipping; demurrage; detention; laytime; charter party; bill of lading

REFERENCES

1. Voynichenko, V. V. (2005). *Volny mirovogo frakhtovogo rynka*. Retrieved from <https://ports.com.ua/articles/archive/volny-mirovogo-frakhtovogo-rynka> (in Russian)
2. Voynichenko, V. V. (2011). *Vopreki prognozam*. Retrieved from <https://ports.com.ua/articles/archive/vopreki-prognozam> (in Russian)
3. Drozhzhyn, O. L. (2019). *Organization of container-ship operation on feeder lines*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Odesa National Maritime University, Odesa (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

4. Kirillova, Y. V. (2010). *Formy sudokhodstva: uchebnoe posobie*. Odessa: Izdatelstvo ONMU. (in Russian)
5. Onyshchenko, S. P., & Koskina, Y. O. (2015). Research of the effect of terms and conditions of an offer on successful conclusion of the freight transaction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(3(78)), 25-32. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55738> (in Ukrainian)
6. *Proformy charterov*. (1994). (Vol. 1). St. Petersburg. (in Russian)
7. Yermolaev, V. G., Kokin, A. S., Lugovtsev, A. F., Makovskiy, A. L., & Kokin, A. S. (Ed). (1998). *Yuridicheskiy spravochnik po trgovomu moreplavaniyu*. Moscow: Spark. (in Russian)
8. Brodie, P. (2016). *Commercial Shipping Handbook*. Routledge: Informa Law. (in English)
9. Certificate in Laytime and Demurrage: Lloyd's Maritime Academy (2019). *Independent*. Retrieved from <https://u.to/poFwFQ> (in English)
10. Laytime & Demurrage Masterclass. (2019). *BIMCO*. Retrieved from <https://www.bimco.org/training/descriptors/laytime-and-demurrage-masterclass> (in English)
11. Mills, S. (2005). *Bills of Lading – A Guide to Good Practice*. Newcastle upon Tyne: The North of England P&I Association. (in English)
12. Olesen, T. R. (2015). *Value creation in the maritime chain of transportation. The role of carriers, ports and third parties in liner and bulk shipping*. GBS Maritime. Retrieved from https://www.cbs.dk/files/cbs.dk/mapping_report_c_value_creation_1.pdf (in English)
13. Onyshchenko, S. P., & Koskina, Y. A. (2019). Estimation of the vessel's arrival at port. *Science and Transport Progress*, 1(79), 39-50. doi: <http://doi.org/10/15802/stp2019/158478> (in English)
14. Schofield, J. (2016). *Laytime and demurrage*. Routledge: Informa Law. (in English)
15. Ship Chartering, Laytime and Demurrage Masterclass: Resolution of Commercial & Legal Complexities (2019). *EuroMaTech*. Retrieved from <http://www.euromatech.com/seminars/ship-chartering-laytime-demurrage-masterclass> (in English)
16. Ship congestion hits China's ports. (2017). Retrieved from <http://shipsandports.com.ng/ship-congestion-hits-chinas-ports/> (in English)
17. Terms for Detention and Demurrage. (2013). Retrieved from https://terms.maerskline.com/d_and_d (in English)

Надійшла до редколегії: 17.01.2019

Прийнята до друку: 24.05.2019

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

UDC 625.712.36:620.92

A. ZARKESHEV^{1*}, C. CSISZAR^{2*}

^{1*}Dep. «Transport Technology and Economics», Budapest University of Technology and Economics, Stoczek St., 2., Budapest, Hungary, 1111, tel. +36 (20) 263 66 72, e-mail zarkeshev.azamat@mail.bme.hu, ORCID 0000-0002-5065-2483

^{2*}Dep. «Transport Technology and Economics», Budapest University of Technology and Economics, Stoczek St., 2., Budapest, Hungary, 1111, tel. +36 (20) 263 66 72, e-mail csiszar.csaba@mail.bme.hu, ORCID 0000-0002-4677-3733

HYDROELECTRIC ROAD RAMP

Purpose. The purpose of the study was to elaborate on a renewable source of energy using daily vehicles' traffic. The research question was how to produce electricity by using vehicle's kinetic energy and water-contained energy. In this paper «hydroelectric road ramp» is described as an auxiliary energy source which can be used in smart cities.

Methodology. By conducting the literature review of adjacent methods and existing inventions, combining principles of work of these inventions, the system for producing electricity without destroying nature has been designed.

Findings. Based on the supposition that 200 vehicles per hour pass over a ramp, the findings show that power generated by the system equals to 405,34 W. Considering the fact, that city roads function around the clock we can multiply the obtained result by 24 hours. Thus, we can accumulate a lot of electricity for efficient using in necessary goals. Even considering the fact that road capacity is different hour by hour, there is an opportunity to generate enough electricity for its conservation and further usage. **Originality.** From one side 'hydroelectric road ramp' is the system of generating electricity by using principles of work of conventional hydroelectric power station and pneumatic water sprayer, from the other side it is a speed breaker which may improve the safety conditions on the road.

Practical value. The calculations we obtained led us to the theoretical conclusion that electricity getting from new source can be effectively used in the 'smart city' such as: powering street lights, traffic lights or serve as a complementary source of energy for e-mobiles charging points.

Keywords: alternative energy; kinetic energy; water-contained energy; electricity; smart city; speed breaker

Introduction

There is a fact that renewable energies are considered as proper alternative energy, which reduces carbon dioxide emission. This means renewable energy like wind energy, solar, tidal, biomass, geothermal which are not harmful for environment can be used as alternative. As a car passes over a speed breaker most of kinetic energy is wasted as heat in it. However, the speed bumps on roads, where huge amount of vehicle's kinetic energy is wasting, can be used to retrieve this kinetic energy and generating electricity [1].

There are some methods of converting vehicle's kinetic energy into electrical energy such as follows: «Electro-Kinetic Road Ramp» [2] which was

tested in some countries and proved its effectiveness or 'Design of Power Generation Unit Using Roller Mechanism' which is implemented by using simple drive mechanism such as Roller, some interfaced Electrical components and chain drive Mechanism [6].

Nevertheless, we propose novel non-conventional method called 'hydroelectric road ramp' that is significantly different from the proposed by previous researchers. 'Hydroelectric road ramp' serves not only as a speed bump for traffic calming, but also it is a new method of generating electricity by using principles of work of conventional hydroelectric power station [7] and pneumatic water sprayer [10].

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Purpose

The purpose of the study was to elaborate on a renewable source of energy using daily vehicles' traffic. The research question was how to produce electricity by using vehicle's kinetic energy and water-contained energy. The calculation of power output has been calculated considering approximate identified variables. Also during the calculation we considered X vehicles per hour, however practical result can be distinguished from the theoretical one due to stochastic process of the vehicle's movement. We have presumed that electricity getting from new source can be conserved and used in traffic lights, powering streets or serve as a supplementary source of energy for electro mobility charging points.

This paper does not provide a detailed analysis of material properties and technical characteristics of the system elements such as turbine, electronic pressure controller, tank, etc., as well as cost calculation. The study is purely theoretical, as a practical experiment requires significant resources. Therefore, approximate initial numerical data which are shown in Fig.2 have been used during energy calculation.

Methodology

Publicly accessible sources like standards, scientific articles, and reports contain limited information on the proposed method of electricity generating. To overcome this shortcoming, further information is collected through the literature review of adjacent methods and existing inventions. Combining principles of work of these inventions, the necessary result was received. Fig. 1 illustrates the research approach, which includes a literature review of several relevant inventions in order to collect information and create a non-conventional method of producing electricity.

The calculation methodology included the following steps:

- calculation of the volume of the reservoir;
- a finding of the gauge pressure in the tank after n number of pumps;
- amount of water in each stroke of the pump has been found;
- identification of an absolute pressure inside the tank;

- determination the velocity at which the water leaves the tank using the Bernoulli equation;
- calculation of the volume rate of flow;
- calculation of power generated by the system.

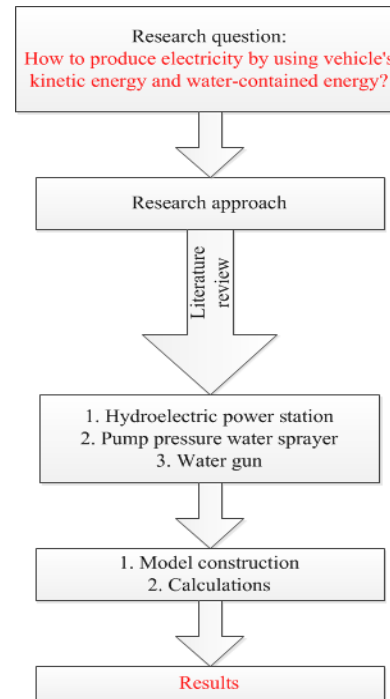


Fig. 1. Research methodology

Model description

The ramp serves as launching mechanism [4] for hydroelectric power station by harnessing the kinetic energy of automobiles that drive over ramp. It is not dangerous for the vehicles and cannot become the cause of waste petrol when a car passes over it [5]. Because on the road surface it serves only as a conventional speed breaker, however in underground it connects with mini station producing electricity with water usage [8]. Fig. 2 represents the ramp structure and principle of work.

Slab of the ramp connects with the cylinder which serves as a piston rod of the pump. Every time automobiles pass through this plate the piston moves down and up pumping air into a partially water-filled tank. Motion is possible thanks to the spring installed under the plate. If necessary, several springs can be installed. The reservoir is airtight, but it has valve to let the incoming air in from the pump.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

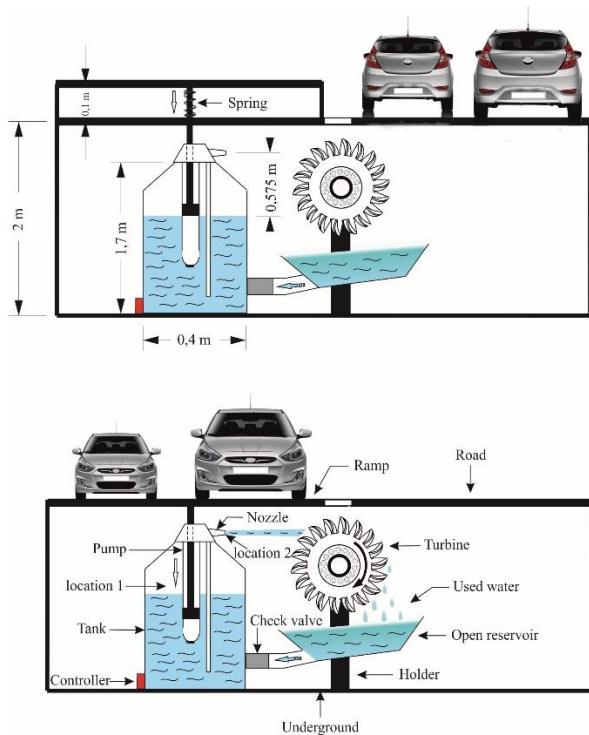


Fig. 2. Energy ramp structure

As more air is pumped in, the air in the reservoir is compressed, increasing in pressure; the water is also pressurized by the now compressed air. Upon opening the nozzle valve, the pressurized water is pushed out through the nozzle as the air attempts to re-equilibrate with atmospheric pressure [3].

In case of our study, the nozzle valve is an automatically controlled valve operated by the electronic pressure controller. The controller activated automatically according to the adjustments of the specialists, i.e., when the pressure in tank reaches certain value or is excessive. It means that every time, when electronic pressure controller identifies pre-defined value of pressure in the reservoir it transmits a signal to open the nozzle valve.

This air pressure system allows production of a solid, continuous stream of water. The water jet rotates the turbine connected with the generator which produces electricity [9]. In the case of this research, we supposed that it is necessary to use special turbine that must be created by 'pelton turbine' principle. All necessary dimensions must be performed by professionals.

The water, bouncing off the turbine, flows into an open reservoir located under the turbine. Then it flows again into the main tank through the non-

return valve. Thus, the system is constantly recycling the same water. Therefore 'Hydroelectric road ramp' can be counted as renewable energy source.

To start the system, only the initial water filling of the container is required. Refilled is necessary only in emergency cases such as water leakage, evaporation of water, repair of the structure, etc. However, the limitation of this design is the tank cannot be refilled unless depressurized. Opening a pressurized reservoir while there is pressure remaining in the system can result in copious local water spray or even an unexpected consequence.

Fig. 3 illustrates the operation of the 'hydroelectric road ramp'

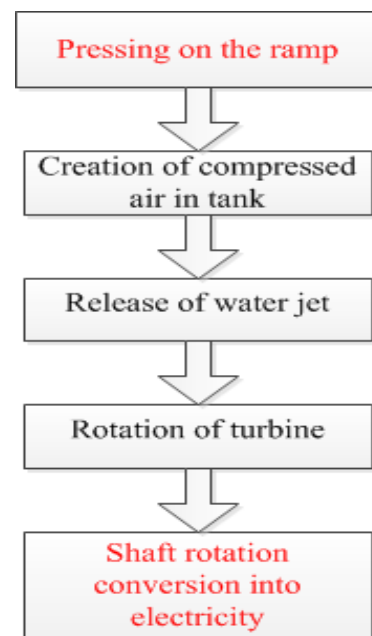


Fig. 3. Process diagram of the ramp

Findings

For all calculation, we used assumed dimensions of the ramp which is shown in Fig. 2. Since the tank represents a combination of cylinder and frustum then the total volume of the tank is the sum of their volumes:

$$V_t = V_c + V_f. \quad (1)$$

The volume of cylinder:

$$V_c = \pi r^2 h, \quad (2)$$

$$V_c = 3,14 \times 0,2^2 \times 1,5 = 0,18 \text{ m}^3. \quad (3)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

The volume of frustum:

$$V_f = \frac{1}{3} \pi h (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2), \quad (4)$$

$$V_f = \frac{1}{3} \times 3,14 \times 0,2 (0,2^2 + 0,2 \times 0,1 + 0,1^2) = 0,014 \text{ m}^3. \quad (5)$$

The total volume of tank:

$$V_t = 0,18 + 0,014 = 0,194 \text{ m}^3 = 194 \text{ l}. \quad (6)$$

The assumption is made that volume of water equal 150 l. The volume of air is then the difference between the volumes of the tank and the water within it:

$$V_a = V_t - V_w, \quad (7)$$

$$V_a = 194 - 150 = 44 \text{ l}, \quad (8)$$

To identify an absolute pressure at location 1 we used the following formula:

$$P_a = P_o + P_m, \quad (9)$$

where, P_o – atmospheric pressure (101325 Pa); P_m – gauge pressure.

Using an assumption that 200 vehicles per hour pass over ramp, we calculated the gauge pressure in a tank after n pumps:

$$P_m = \frac{n P_o V_p}{V_t - n V_p}, \quad (10)$$

where, n – number of pumps ($n=400$), because one car pushes on slab two times by front and rear wheels; P_o – atmospheric pressure (101325 Pa);

V_p – amount of water in each stroke of the pump;

V_t – total volume of tank.

Amount of water in each stroke of the pump can be found by next formula:

$$V_p = \frac{V_w}{n}, \quad (11)$$

where, V_w – volume of water; n – number of pumps

$$V_p = \frac{150}{400} = 0,375 \text{ (l)}. \quad (12)$$

Thus, gauge pressure equal:

$$P_m = \frac{400 \times 101325 \times 0,375}{194 - 400 \times 0,375} = 345426 \text{ (Pa)}. \quad (13)$$

Consequently, location 1 has the following absolute pressure:

$$P_a = 101325 + 345426 = 446751 \text{ (Pa)}. \quad (14)$$

To define the velocity at which the water leaves the tank is used the Bernoulli equation. The Bernoulli equation is used to connect two locations within a single fluid. We chose our two locations as being at the surface of the water in the reservoir (location 1) and at the exit of the nozzle (location 2). This means that:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2, \quad (15)$$

where, P_1 – absolute pressure at location 1; ρ – density of water (1000 kg/m^3); v_1 – water velocity at location 1. We approximate that $v_1 = 0$; g – acceleration of gravity ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$); h_1 – height between location 1 and location 2 ($h_1 = 0,575 \text{ m}$); P_2 – pressure at location 2. Location 2 touches the air and has pressure $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$; v_2 – water velocity at location 2; h_2 – height at location 2. This variable is neglected, which means that $h_2 = 0$.

In this case the equation acquires a new form:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 + \rho g h_1 - P_2)}{\rho}}, \quad (16)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \times (446751 + 1000 \times 9,81 \times 0,575 - 101325)}{1000}} = 26,5 \text{ (m/s)}. \quad (17)$$

If the water exits the tank through the hole with diameter 0,02 m, the volume rate of flow can be calculated by this equation:

$$Q = A v = \pi r^2 v, \quad (18)$$

$$Q = 3,14 \times 0,01^2 \times 26,5 = 0,008 \text{ (m}^3/\text{s)}. \quad (19)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Despite the fact that in modern conditions under favorable working conditions of the best samples hydraulic efficiency can achieve 94 – 95 %. We decided to consider that efficiency of proposed mechanism is about 50%, which means that $e = 0,5$. Power generated by the system can be calculated with the next formula:

$$P = e \frac{\Delta E}{\Delta t} = e \frac{\Delta mgh}{\Delta t} = egh \frac{\Delta m}{\Delta t}, \quad (20)$$

where, e – efficiency of mechanism; g – acceleration of gravity ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$); h – head in meters. Since the pressure at location 2 equal 1 atm , then $h = 10,33 \text{ (m)}$; $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ – flow volume in kg/sec .

Thus,

$$P = 0,5 \times 9,81 \times 10,33 \times 8 = 405,34 \text{ (W)}. \quad (21)$$

Originality and practical value

From one side 'hydroelectric road ramp' is the system of generating electricity by using principles of work of conventional hydroelectric power station and pneumatic water sprayer, from the other side it is a speed breaker which may improve the safety conditions on the road. This is a new system which is located underground and may use different types of water including wastewater (rain, snow, hail) with preliminary filtration. Using the Bernoulli equation, other different formulas, and assumptions, we calculated the approximate power generated by the system. The calculations we obtained led us to the theoretical conclusion that electricity getting from new source can be effectively used in the 'smart city' such as: powering street lights, traffic lights or serve as a complementary source of energy for e-mobiles charging points.

Conclusions

The amount of electricity generating using proposed system is flexible, because the movement of vehicles on the road is a stochastic process. It is impossible to predict exact quantity of vehicles

pass over ramp. Moreover, intensity of movement depends on different conditions and circumstances such as rush hours and traffic jams. Nevertheless, calculation result's based on the supposition that 200 vehicles per hour pass over ramp looks enough fair and the power generated by the system equals to 405,34 W. Considering the fact, that city roads function around the clock we can multiply the obtained result by 24 hours. Thus, we can accumulate a lot of electricity for efficient using in necessary goals. Even considering the fact that road capacity is different hour by hour, there is an opportunity to generate enough electricity for its conservation and further usage.

Among the main contribution of the paper we highlight the possibility of producing almost free electricity based on renewable energy. Our results may have high relevance for innovation and development. Key advantages of the proposed system are as follows:

- renewable source of energy;
- possibility to increase amount of electricity generating per hour;
- possibility to conserve and use electricity for different goals;
- possibility of modernization of proposed system.

As the practical application and improvement of the new method is an enormous and complex task, not only intuitively but also physically, future research is expected to proceed in several directions. Our future plans, based on this research, include:

- modernization of the ramp model by integration of information systems;
- detailed analysis of hardware and software model;
- significant increase of the shaft rpm using high pressure nitrogen gas (N_2) in system;
- addition of supplementary elements such as drain, filter, plumbing for using wastewater (rain, hail, snow, etc.);
- assessment of socioeconomic benefits (e.g. electricity cost reduction).

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Electro-Kinetic Road Ramp / S. Jaiswal, A. Pundir, S. Saxena, R. Gupta // *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*. – 2015. – Vol. 2. – Spec. Iss. 1. – P. 221–223.
2. Green Road: Harvesting Wasted Vehicular Kinetic Energy from Transportation Infrastructure [Electronic resource] / C. Schramm, J. Grotton, K. Poss, W. Evangelakos. – Worcester, 2016. – Available at: https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042816-111324/unrestricted/Green_Road_MQP.pdf – Title from the screen. – Accessed : 21.05.2019.
3. Lam, L. The continuous refill, short-burst, hand-powered water toy [Electronic resource] / L. Lam. – 2010. – Available at: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/59943/676918672-MIT.pdf?sequence=2&isAllowed=y> – Title from the screen. – Accessed : 15.05.2019.
4. Ramadan, M. Using speed bump for power generation – Experimental study / M. Ramadan, M. Khaled, H. El Hage // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 75. – P. 867–872. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.192>
5. Rosqvist, L. S. Vehicular emissions and fuel consumption for street characteristics in residential areas [Electronic resource]. – Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/3205/93dfa9eb1c082bb52d10bfd833e83789a00d.pdf> – Title from the screen. – Accessed : 15.05.2019.
6. Sarma, B. S. Design of Power Generation Unit Using Roller Mechanism / B. S. Sarma, V. Jyothi, D. Sudhir // *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 55–60. doi: <https://doi.org/10.9790/1676-09315560>
7. Sustainable hydropower in the 21st century / E. F. Moran, M. C. Lopez, N. Moore, N. Müller, D. W. Hyndman // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2018. – Vol. 115. – Iss. 47. – P. 11891–11898. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1809426115>
8. The role of hydro power, storage and transmission in the decarbonization of the Chinese power system / H. Liu, T. Brown, G. B. Andresen, D. P. Schlachtberger, M. Greiner // *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 239. – P. 1308–1321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.009>
9. Zhang, Z. Pelton Turbines / Z. Zhang. – Cham : Springer International Publishing, 2016. – 311 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31909-4>
10. Zhu, N. A Brief Review on Design and Operation Principle for Nozzles. Discharging Water Mist [Electronic resource] / N. Zhu, W. K. Chow // 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (17-20, March, 2004, Daegu, Korea). – Daegu, 2004. – Available at: https://www.iafss.org/publications/aofst/6/6c-1/view/aofst_6-6c-1.pdf – Title from the screen. – Accessed : 17.05.2019.

A. ЗАРКЕШЕВ^{1*}, С. ЧІСАР^{2*}

^{1*}Каф. «Транспортні технології та економіка», Будапештський університет технологій та економіки, вул. Сточек, 2, Будапешт, Угорщина, 1111, тел. +36 (20) 263 66 72, ел. пошта zarkeshev.azamat@mail.bme.hu, ORCID 0000-0002-5065-2483

^{2*}Каф. «Транспортні технології та економіка», Будапештський університет технологій та економіки, вул. Сточек, 2, Будапешт, Угорщина, 1111, тел. +36 (20) 263 66 72, ел. пошта csiszar.csaba@mail.bme.hu, ORCID 0000-0002-4677-3733

ГІДРОЕЛЕКТРИЧНА ДОРОЖНЯ ЕСТАКАДА

Мета. Основною метою цього дослідження є розробка поновлюваного джерела енергії з використанням щоденного руху транспортних засобів. Проблема дослідження полягає в пошуку способу вироблення електрики з використанням кінетичної енергії автомобіля й енергії води. У цій статті гідроелектрична дорожня рампа описана як допоміжне джерело енергії, яке можна застосовувати в «інтелектуальних містах».

Методика. Після огляду літератури щодо суміжних методів, наявних винаходів і об'єднання вивчених принципів роботи була запропонована екологічно безпечна система виробництва електроенергії.

Результати. На підставі припущення, що за годину по естакаді проїжджають 200 автомобілів, установлено, що потужність, генерована системою, дорівнює 405,34 Вт. Беручи до уваги, що міські дороги працюють цілодобово, отриманий результат помножимо на 24. Таким чином, можна накопичити багато електроенергії для ефективного використання в необхідних цілях. Навіть з урахуванням того, що пропускна здатність дороги змінюється щогодини, є можливість виробляти достатньо електроенергії для її збереження й подальшого використання. **Наукова новизна.** З одного боку, гідроелектрична дорожня естакада – це система генерування електроенергії з використанням принципів роботи звичайної гідроелектростанції й пневматичного

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

водорозпилювача, з іншого боку, вона виконує роль лежачого поліцейського, що може підвищити безпеку дорожнього руху. **Практична значимість.** Проведені розрахунки дозволили нам зробити теоретичний висновок, що отримання електроенергії з нового джерела можна ефективно використати в «інтелектуальному місті», наприклад, для живлення вуличних ліхтарів, світлофорів, або як додаткове джерело енергії для пунктів підзарядження електромобілів.

Ключові слова: альтернативна енергія; кінетична енергія; енергія води; електрика; «інтелектуальне місто»; лежачий поліцейський

А. ЗАРКЕШЕВ^{1*}, С. ЧИСАР^{2*}

^{1*}Каф. «Транспортные технологии и экономика», Будапештский университет технологий и экономики, ул. Сточек, 2, Будапешт, Венгрия, 1111, тел. +36 (20) 263 66 72, эл. почта zarkeshev.azamat@mail.bme.hu, ORCID 0000-0002-5065-2483

^{2*}Каф. «Транспортные технологии и экономика», Будапештский университет технологий и экономики, ул. Сточек, 2, Будапешт, Венгрия, 1111, тел. +36 (20) 263 66 72, эл. почта csiszar.csaba@mail.bme.hu, ORCID 0000-0002-4677-3733

ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДОРОЖНАЯ ЭСТАКАДА

Цель. Основной целью данного исследования является разработка возобновляемого источника энергии с использованием ежедневного движения транспортных средств. Проблема исследования состоит в поиске способа производства электричества с использованием кинетической энергии автомобиля и энергии воды. В этой статье гидроэлектрическая дорожная рампа описана как вспомогательный источник энергии, который можно применять в «интеллектуальных городах». **Методика.** После обзора литературы по смежным методикам, существующим изобретениям и объединения изученных принципов работы была предложена экологически безопасная система производства электроэнергии. **Результаты.** На основании предположения, что за час по эстакаде проезжают 200 автомобилей, установлено, что мощность, генерируемая системой, равна 405,34 Вт. Принимая во внимание то, что городские дороги работают круглосуточно, полученный результат умножаем на 24. Таким образом, можно накопить много электроэнергии для эффективного использования в необходимых целях. Даже с учетом того, что пропускная способность дороги изменяется от часа к часу, есть возможность вырабатывать достаточно электроэнергии для ее сохранения и дальнейшего использования. **Научная новизна.** С одной стороны, гидроэлектрическая дорожная эстакада – это система генерирования электроэнергии с использованием принципов работы обычной гидроэлектростанции и пневматического водораспылителя, с другой стороны, она выполняет роль лежачего полицейского, что может повысить безопасность дорожного движения. **Практическая значимость.** Произведенные расчеты позволили нам прийти к теоретическому выводу, что получение электроэнергии из нового источника может быть эффективно использовано в «интеллектуальном городе», например, для питания уличных фонарей, светофоров или в качестве дополнительного источника энергии для пунктов подзарядки электромобилей.

Ключевые слова: альтернативная энергия; кинетическая энергия; энергия воды; электричество; «интеллектуальный город»; лежачий полицейский

REFERENCES

1. Jaiswal, S., Pundir, A., Saxena, S., & Gupta, R. (2015). Electro-Kinetic Road Ramp. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*, 2(Spec. 1), 221-223. (in English)
2. Schramm, C., Grotton, J., Poss, K., & Evangelakos, W. (2016). *Green Road: Harvesting Wasted Vehicular Kinetic Energy from Transportation Infrastructure*. Worcester. Retrieved from https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042816-111324/unrestricted/Green_Road_MQP.pdf (in English)
3. Lam, L. (2010). *The continuous refill, short-burst, hand-powered water toy*. Retrieved from <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/59943/676918672-MIT.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (in English)
4. Ramadan, M., Khaled, M., & Hage, H. E. (2015). Using Speed Bump for Power Generation – Experimental Study. *Energy Procedia*, 75, 867-872. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.19> (in English)
5. Rosqvist, L. S. (n.d.). Vehicular emissions and fuel consumption for street characteristics in residential areas. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/3205/93dfa9eb1c082bb52d10bfd833e83789a00d.pdf> (in English)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

6. Sarma, B. S., Jyothi, V., & Sudhir, D. (2014). Design of Power Generation Unit Using Roller Mechanism. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 9(3), 55-60. doi: <https://doi.org/10.9790/1676-09315560> (in English)
7. Moran, E. F., Lopez, M. C., Moore, N., Müller, N., & Hyndman, D. W. (2018). Sustainable hydropower in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(47), 11891-11898. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1809426115> (in English)
8. Liu, H., Brown, T., Andresen, G. B., Schlachtberger, D. P., & Greiner, M. (2019). The role of hydro power, storage and transmission in the decarbonization of the Chinese power system. *Applied Energy*, 239, 1308-1321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.009> (in English)
9. Zhang, Z. (2016). *Pelton Turbines*. Cham: Springer International Publishing. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31909-4> (in English)
10. Zhu, N., & Chow, W. K. (2004). *A Brief Review on Design and Operation Principle for Nozzles. Discharging Water Mist*, 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology. Daegu. Retrieved from https://www.iafss.org/publications/aofst/6/6c-1/view/aofst_6-6c-1.pdf (in English)

Received: Feb. 01, 2019

Accepted: May 31, 2019

УДК 656.22

М. Г. ПРИТУЛА^{1*}, О. А. ПАСЕЧНИК^{2*}

^{1*}Центр математичного моделювання НАНУ, вул. Дудаєва, 15, Львів, Україна, 79053, тел. +38 (032) 261 18 85,
ел. пошта myroslav.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}Державне підприємство «Проектно-конструкторське технологічне бюро з автоматизації систем управління на залізничному транспорті України», вул. Жилянська, 97, Київ, Україна, 01135, тел. +38 (044) 226 24 82,
ел. пошта sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

ОПТИМІЗАЦІЙНІ ТЯГОВІ ЗАДАЧІ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Мета. Робота передбачає розроблення інформаційного й алгоритмічного забезпечення для проведення оптимізаційних тягово-енергетичних розрахунків на залізничній мережі з метою їх подальшого використання в системах ефективного управління перевізним процесом. **Методика.** В основі дослідження – графоаналітична система, модель руху поїзда з різними типами тяги, методи оптимального управління поїздом і фундаментальні алгоритми на зважених графах із можливими паралельними ребрами (дугами). У комплексі ці складові системи забезпечують знаходження на граф-схемі шляхів за заданими критеріями, проведення оптимізаційних тягово-енергетичних розрахунків, а також порівняльного аналізу отриманих результатів. Достовірність результатів неодноразово перевірено наявними способами для різної складності перегонів за планом і профілем траси. Для цього використано дані, отримані в результаті проведення контрольних поїздок із застосуванням динамометричних вагонів, а також проведено порівняльний аналіз режимів роботи поїздів, розрахованих та отриманих кваліфікованими машиністами на різних перегонах. **Результати.** Розглянуто проблему ефективної експлуатації різних типів і модифікацій локомотивів, задіяних у реалізації графіків руху поїздів різного призначення й навантаження. Наведено постановку прямих та обернених оптимізаційних, за різними критеріями, режимних задач на залізничній мережі й варіанти їх ефективного розв’язування. Подано аналіз результатів розробленого математичного забезпечення й ідеї реалізованих алгоритмів. **Наукова новизна.** У роботі запропоновано постановку мережних оптимізаційних задач, які виникають на етапах розроблення плану формування поїздів, побудови графіків руху, оцінки пропускної здатності й розрахунку оптимальних параметрів складових графіків руху тощо. Важливим є системний підхід, що забезпечив поєднання розробленої моделі мережі в універсальних термінах теорії графів із системою актуалізації їх параметрів. Тягово-енергетичні розрахунки проведено методами комбінаторної оптимізації, що забезпечило максимальний рівень автоматизації процесу розв’язування великого набору прямих та обернених режимних задач із різними критеріями оптимальності. **Практична значимість.** Розроблено інформаційне й алгоритмічне забезпечення для автоматизації процесу розв’язування прямих та обернених режимних тягово-енергетичних задач на залізничній мережі, яке пройшло апробацію в процесі розрахунку основних складових для формування графіків руху, аналізу режимів ведення поїздів, оцінки вибору оптимальних параметрів реконструкції колійного полотна для швидкісних і нових типів поїздів (локомотивів).

Ключові слова: тягові розрахунки; залізнична мережа; фундаментальні алгоритми; режим руху; оптимальний режим; графік руху; безпека руху; математичне забезпечення

Вступ

Залізниця як складна система є одним із найбільших споживачів палива, електроенергії та інших матеріальних і нематеріальних ресурсів. Основна проблема залізничного транспорту – ефективне управління потоками вантажів і пасажирів на всіх етапах – від їх формування до місць доставки. Ефективність функціонування такої системи вимагає забезпечити організацію потоків вагонів і їх упорядкованого руху в складах поїздів згідно з графіками руху, з максимальною безпекою, економічністю то-

що. У багатьох випадках виникає необхідність забезпечити максимальну реалізацію пропускної й перевізної здатності, оперативного коригування, за потреби, потоків вагонів і поїздів, відповідно і графіків руху в разі виникнення нештатних ситуацій тощо. Усі процеси на мережі залізниць є взаємопов’язаними, тому їх потрібно аналізувати в комплексі. Системний аналіз таких процесів вимагає наявності певних інструментів – систем оперативної розробки плану формування, оперативного планування роботи станцій і прокладання ниток графіка

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

руху поїздів тощо. На жаль, таких систем, які б у реальному часі забезпечували оптимальне розв'язання згаданих задач, на залізниці України не існує. Відсутність системного підходу до проведення наукових досліджень не сприяє реалізації наявного наукового кадрового потенціалу як загалом в Україні, так і в самій структурі залізниці зокрема.

Список використаних джерел [1–24] містить роботи, у яких наведено розроблення алгоритмічного забезпечення для розв'язування оптимізаційних задач на мережах [1–2, 10–11]; моделі руху поїзда й результати їх апробації [3–9]; дослідження з теми роботи за кордоном [10–22].

У наведеному списку є небагато завершених робіт, присвячених тяговим розрахункам на залізничній мережі України. В оглядовій роботі [3] подано перелік наявних методів визначення енергооптимальних режимів руху електричного рухомого складу без порівняльного аналізу їх використання й апробації із залученням реальних даних. Зазначено, що зазвичай для побудови оптимального управління рухом поїзда застосовують принцип максимуму академіка Л. С. Понтрягіна. Одночасно в роботі наведені й аргументи неефективності його використання саме для розв'язування тягових задач.

У дослідженнях, які проведені за межами України [12–24], проблему оптимізації траєкторії швидкості руху поїздів розглядають у сукупності з проблемами оптимізації графіків руху, експлуатації поїздів за умови оптимального коригування режимів руху в разі їх затримки (максимальне наближення до запланованого розкладу), побудови ефективної інформаційно-дорадчої системи машиніста тощо. При цьому для оптимізації траєкторії руху поїздів використовують оптимальні стратегії й методи нелінійного й динамічного програмування для забезпечення енергоефективних режимів руху з обмеженнями швидкостей і пропускнуою здатністю тощо.

У багатьох вищезгаданих роботах наведена інформація щодо апробації розробленого математичного забезпечення в окремих країнах, а також національні особливості експлуатації й функціонування залізничного транспорту. Безперечно, свої особливості існують і в Україні, які полягають у наступному:

– централізоване управління перевізним процесом на залізничній мережі;

– незначна частка приватного капіталу в управлінні інфраструктурою української залізниці;

– значна протяжність залізничних колій і розвиненість станційної інфраструктури;

– відмінності за параметрами й технологією управління від європейської колійної системи;

– неповна електрифікація залізниць, що зумовлює зміну тяги на роздільних пунктах.

Окремі особливості впливають як на технологію функціонування залізниці, так і на постановку оптимізаційних задач. Тому певні технологічні рішення для іноземних залізниць не можна безпосередньо переносити на українську залізницю.

У сучасних умовах господарювання досить актуальною проблемою є отримання максимального прибутку. Один із можливих шляхів полягає у створенні системи формування обґрунтованих тарифів на вантажні й пасажирські перевезення, наприклад, збільшення тарифів або зменшення собівартості перевезень і, відповідно, тарифів на них. Тягово-енергетичні розрахунки на мережі залізниць дозволяють: досягати максимальної маси поїздів; управляти швидкістю перевезень у певних діапазонах; перерозподіляти потоки в системі залізниць, що приводить до зростання ступеня використання потужності локомотивів; нарощувати пропускну й перевізну здатність ділянок і напрямків. У кінцевому підсумку знижується собівартість перевезень.

Мета

Основна мета роботи – запропонувати методи використання тягово-енергетичних розрахунків на залізничній мережі для ефективного управління перевізним процесом. Одним із можливих підходів щодо забезпечення ефективного управління є виявлення та максимальна реалізація наявного потенціалу оптимізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно: розробити інтегроване інформаційне забезпечення для тягово-енергетичних розрахунків на залізничній мережі; поставити основні оптимізаційні задачі розрахунку режимних параметрів; розробити алгоритми знаходження енергооптимальних маршрутів руху поїздів із різними типами тяги.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Методика

Для розв'язання поставлених задач використано засоби математичного та імітаційного моделювання із застосуванням класичних фундаментальних алгоритмів на зважених графах. Розроблену математичну модель руху поїзда в просторових координатах із розподіленою масою вздовж траєкторії руху реалізовано числовим інтегруванням моделі методом скінченних різниць. Розрахунок оптимальних траєкторій швидкості руху на граф-схемі залізниці проведено згідно із заданими критеріями оптимальності методами комбінаторної оптимізації.

Результати

Розроблено графічний редактор, який забезпечив формування математичної моделі структури залізничних колій, інформаційного забезпечення для розв'язування тягово-енергетичних задач на мережі залізниці, прокладання оптимальних за заданими критеріями шляхів між різними роздільними пунктами, автоматизацію процесу розв'язування режимних задач для потреб оперативного формування та зміни графіків руху тощо [4–9]. Наведені приклади розв'язування основних наборів задач підтверджують високу ефективність розробленого математичного й програмного забезпечення. Розширення сфери експлуатації програмного комплексу дозволить приймати обґрунтовані рішення для організації руху пасажирських і вантажних поїздів у реальних постійно змінюваних ситуаціях.

Мережа залізничних колій. Задання залізничної мережі в термінах графів дозволяє формалізувати об'єкт. Для розв'язування оптимізаційних задач на залізничній мережі використовують відомі фундаментальні алгоритми на графах [1–2]. Різне вагове «навантаження» об'єктів графа на схемі залізниць уможливорює постановку та розв'язування різних оптимізаційних задач. Вага ребра може вказувати на довжину перегону між двома станціями; найбільшу вагу рухомого складу, яка допустима для цієї ділянки шляху; затратні ресурси на тягу; пропускну здатність (середнє число поїздів, що проходять по цій ділянці протягом доби) тощо. У процесі руху поїздів змінюється їх взаємне розташування, потужність тяги і швидкість,

оскільки вони в окремі моменти часу знаходяться на різних частинах поздовжнього профілю. Усе це викликає змінне навантаження на тягові підстанції і впливає на величину втрат електроенергії в контактній мережі.

Розглянемо розроблену систему інформаційної підтримки режимних тягових задач. Структуру залізниць (рис. 1) задано частково орієнтованим мультиграфом із можливими паралельними (у парному чи непарному напрямках) або частково орієнтованими ребрами. Структура в основному є планарною (плоскою). Планарність порушується в окремих частинах граф-схеми та на окремих об'єктах типу роздільного пункту.

Розроблена інформаційна база для оптимізації режимів руху поїздів включає:

- перелік роздільних пунктів (станцій, роз'їздів, блок-постів, ключових парків станцій);
- основні технічні характеристики роздільних пунктів (належність до залізниці, код ЄСР, назва, спеціалізація за родом роботи, система управління стрілочними переводами);
- основні технічні характеристики перегонів (коліїність, орієнтованість руху поїздів (уперед, назад, неорієнтоване), наявність електрифікації, межі станцій);
- поздовжній профіль і план колій, допустимі швидкості руху, наявність обмежень швидкості руху поїздів, координати нейтральних вставок;
- перелік, координати, класифікація поїзних світлофорів;
- графоаналітичні схеми роздільних пунктів.

Для всіх видів тяги й точок на колії задана максимальна швидкість. Будь-яке обмеження швидкості має початок дії (координата кілометражу) й повернення до максимального значення. У випадку редагування обмежень швидкостей користувач задає/змінює задані параметри. Довжина й координата кінця обмеження обчислюється автоматично. Система дозволяє копіювання та присвоєння обмеження швидкостей з іншого виду руху. Додаткове обмеження швидкості має початок дії (координата кілометражу), довжину й повернення до максимальної швидкості. Інтервали додаткових обмежень швидкості не можуть перетинатись між собою. Система дозволяє скопіювати додаткові обмеження швидкостей з іншого виду руху.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

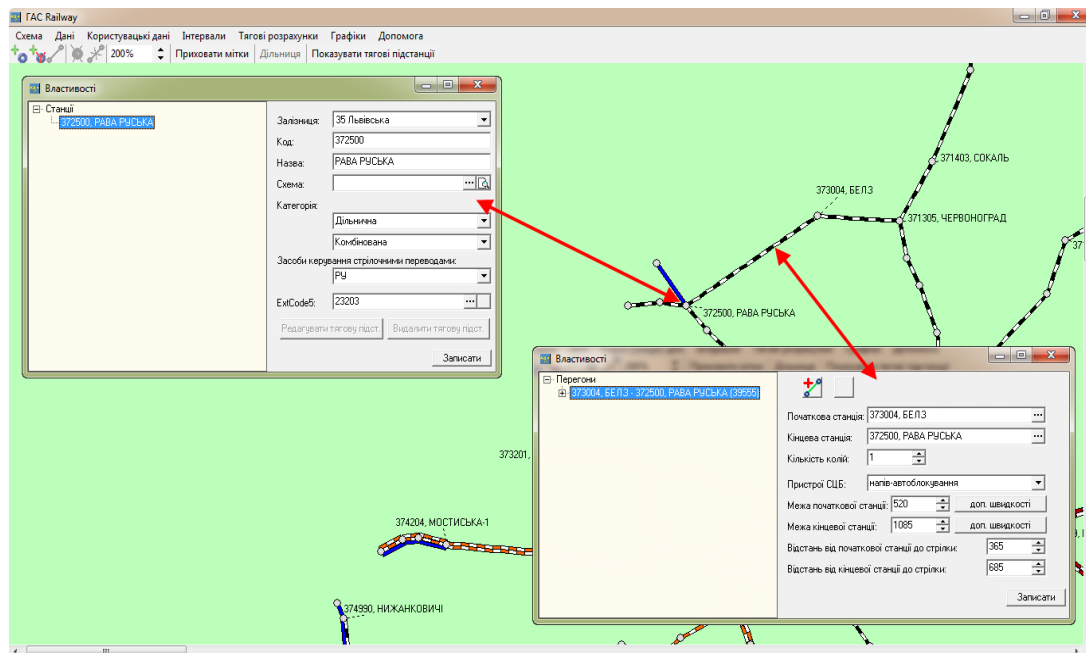


Рис. 1. Частина граф-схеми залізниці України

Fig. 1. Part of the graph-scheme of the Ukrainian railways

Таблиця 1

Основні об'єкти і їх атрибути

Table 1

The main objects and their attributes

Об'єкти	Атрибути
Станції	код; назва; залізниця, до якої належить станція; категорії станції: проміжна, дільнична, вузлова, сортувальна, комбінована, пасажирська, вантажна; засоби керування стрілочними переводами на станції: ДЦ, МРЦ, ЕЦ, МЦ, РУ; код у довіднику станцій
Перегони	інформація про початкову та кінцеву станції: відстань від осі до межі станції, відстань від осі до входної стрілки, обмеження швидкостей у горловині станції (для головної/бічної колії в обох напрямках для всіх видів руху); пристрої СЦБ на перегоні: автоблокування, напівавтоматичне блокування, ключ-желез, інші; інформація про колії перегону: довжина, орієнтація (двобічна, непарна, парна); ширина: 1520; 1435; електрифікація: неелектрифікована, змінного струму, постійного струму; властивості колії: кілометраж, профіль, криві, швидкості, нейтральні вставки, додаткові обмеження швидкості, ізоляційні стики, платформи
Дільниці	«ідентифікатор» – для швидшого пошуку потрібної дільниці

У таблиці позначено:

ДЦ – диспетчерська централізація; МРЦ – маршрутно-релейна централізація; ЕЦ – електрична централізація;

МЦ – механічна централізація; РУ – ручне управління

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/171774>

© М. Г. Притула, О. А. Пасечник, 2019

Таблиця 2

Основні складові об'єктів і їх характеристика

Table 2

The main components of objects and their characteristics

Основні складові об'єктів	Характеристика
Профіль	Профіль має набір елементів із певною довжиною й ухилом. Під час редагування профілю користувач задає довжини й ухили нових елементів або змінює значення наявних. Поля «Початок», «Кінець» (абсолютні координати) й «Початок (кілометраж)», «Кінець (кілометраж)» обчислюються автоматично. Сума довжин усіх елементів повинна бути рівною довжині колії, яку редагують.
Криві	Параметри елементів кривої: початок (задають координатою кілометражу), довжина, радіус, підвищення зовнішньої рейки. Криві не можуть перетинатись.
Нейтральні вставки	Нейтральні вставки – це набір неперетинних інтервалів, які задають координатами кілометражу.
Платформи	Кожна колія перегону може містити набір платформ. Платформу задають координатою й назвою.
Ізоляційні стики	Ізоляційні стики можуть бути прив'язаними до світлофорів, які, у свою чергу, бувають односторонніми або двосторонніми. Тобто ізоляційний стик задають наступними параметрами: координата, тип, тип для зворотного напрямку. Розрізняються наступні типи ізоляційних стиків: вхідний світлофор, вихідний світлофор, попереджувальний світлофор, прохідний світлофор, ізоляційний стик.
Горловини станцій	Система дозволяє відображати й редагувати інформацію про горловини станцій окремої дільниці. Інформація про кожну горловину включає: відстань від осі до межі станції, відстань від осі до вхідної/вихідної стрілки станції, обмеження швидкостей у горловині (швидкості задають окремо для кожного напрямку, для головної/бічної колії, для кожного виду руху).
Станційні колії	Станційна колія, окрім властивостей, які характерні для всіх колій (довжина, орієнтація, ширина, електрифікація, профіль, криві, обмеження швидкості тощо), мають ще і наступні: номер, тип (головна, приймальна, відправна, приймально-відправна, сортувальна, сортувально-відправна, деповська, з'єднувальна, завантажувально-розвантажувальна та ін.); призначення (пасажирська, завантажувально-розвантажувальна, комбінована, маневрова), корисна довжина.
Стрілочні переводи	Стрілочні переводи мають такі властивості: код, тип (правий, лівий, симетричний, перехресний, глухий перетин), марка хрестовини (1/6; 1/9; 1/11; 1/18; 1/18п; 1/22). Кожен тип стрілочного перевodu визначає кількість станційних колій, які він з'єднує, і правила руху поїздів по цих коліях.
Точки входу на станцію	Точки входу на станцію – це межі її схеми. Вони відповідають координатам меж, які задані у властивостях перегонів, що прилягають до станції.
Тупики	До тупика може бути під'єднана тільки одна станційна колія.
Фіктивні вершини	Фіктивні вершини використовують для більш наочного графічного представлення схеми станції (відповідають зміні напрямку прокладання станційних колій). Від фіктивної вершини можуть виходити рівно дві станційні колії.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Схема станції

Scheme of the station

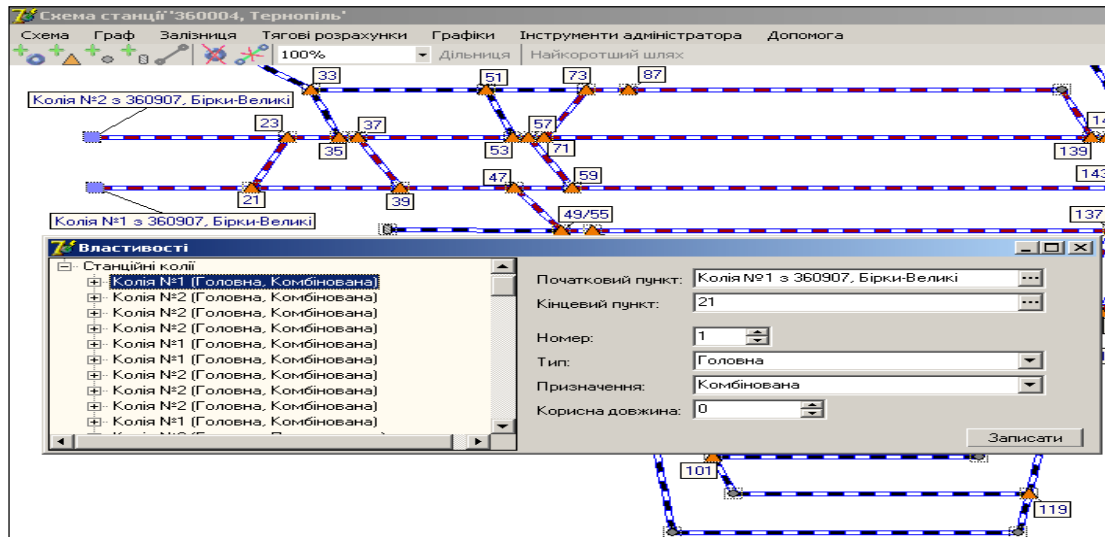


Рис. 2. Властивості станційних колій

Fig. 2. Properties of station tracks

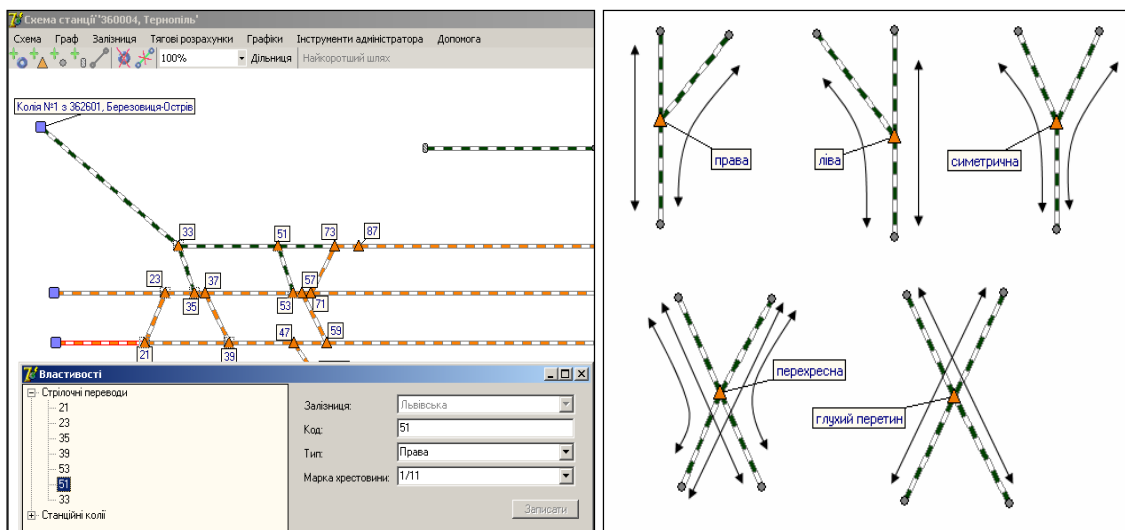


Рис. 3. Правила руху через стрілочні переводи

Fig. 3. Rules of movement through railroad switches

На мережі залізниць можуть виникати різноманітні штатні й нештатні ситуації, які вимагають прокладання замість попереднього нового оптимального шляху руху за тим чи іншим критерієм. Довжиною шляху у зваженому графі називають суму ваги ребер (дуг). Реалізовано можливість задавати, вибирати з бази даних чи розраховувати вагу перегонів – відстань, максимальна маса поїзда заданої довжини, коефіцієнт

стану полотна, коефіцієнт завантаженості за пропускною здатністю, середня швидкість, коефіцієнт економічності тощо. Під час трасування шляхів (виділення послідовності роздільних пунктів) можна також використовувати додаткові умови на тип тяги, мінімальні ухили, включення/виключення окремих наборів роздільних пунктів тощо. Можливі ще й інші види ваг роздільних пунктів – пропускна та переробна зда-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

тність (максимальна і оперативна на заданому інтервалі часі) за видами операцій, максимальна кількість та довжина приймальних станційних колій тощо. Встановлення ваги об'єктів граф-схеми залізничної мережі дозволяє знаходити оптимальні шляхи за заданими критеріями. У разі прокладання траєкторій руху поїздів за тими чи іншими критеріями передбачена можливість урахування їх взаємного впливу на режим руху, графік руху тощо. Також є можливість синхронізувати в часі режими руху поїздів на перегонах і роздільних пунктах. Детальніше розглянемо ці задачі уже в роботах з автоматизації побудови оптимальних графіків руху поїздів.

Алгоритми на граф-схемі залізниці. Основна характеристика алгоритмів на графах – це їх складність. Вона в основному пов'язана з параметрами графа (кількість вершин, ребер, розподіл величини степеня вершин, зв'язність графа (вершинна та реберна) тощо. У нашому випадку степінь вершин є незначним, і тому складність більшості фундаментальних алгоритмів на таких графах буде незначною, що дозволяє організовувати перебірні процедури пошуку оптимальних варіантів за декількома зваженими параметрами. Так, для зв'язного графа $G(V, E)$ з невеликим максимальним степенем вершин $v \in V$, із точністю до деякої константи, складність алгоритмів знаходження найкоротших шляхів є рівною $O(|E| \lg |V|)$ [18–19]. Позитивною властивістю найкоротших шляхів є те, що будь-яка частина найкоротшого шляху є найкоротшою. Цю властивість використовують у задачах динамічного програмування. Зокрема, алгоритм знаходження найкоротшого шляху Флойда–Воршелла [20] ґрунтується на методі динамічного програмування, що дозволяє ставити й розв'язувати окремі оптимізаційні задачі математичного програмування за відповідної постановки. Значний набір оптимізаційних задач із пошуку максимальної пропускної здатності й потоку мінімальної вартості розв'язують із використанням алгоритмів пошуку мінімального розрізу в графі транспортної мережі (теорема Форда–Фалкерсона) [21]. Для цього досить подати залізницю як транспортну мережу.

Тягово-енергетичні розрахунки на граф-схемі залізниці. Система розрахунку режимів руху поїздів складається з інформаційного забезпечення, системи задання розрахунку, алгоритмічного й програмного забезпечення, табличного й графічного представлення результатів моделювання [14]. Усі режимні задачі поставлені й розв'язані як задачі оптимального керування, що забезпечило ефективне розв'язання достатньо повного набору прямих та обернених режимних задач [14]. Математична модель тягових засобів є максимально адекватною: використано повну множину тягових, струмових, енерговитратних, теплових, опірних характеристик для всіх типів приводів і вагонів, а також розподілену масу вздовж довжини поїзда, яка прив'язана до центра мас тягових засобів і вагонів. У розрахунках застосовано траєкторію руху поїздів без її спрямлення та враховано вплив основних зовнішніх факторів: температури повітря, сил зустрічного вітру, підвагонних генераторів тощо. Розроблене алгоритмічне забезпечення дозволило поставити та розв'язати достатньо повний набір прямих та обернених задач оптимізації [14–15].

Критерії оптимізації та ресурси на їх реалізацію. Одним із перспективних засобів підвищення енергоефективності є оптимізація руху поїздів за допомогою стратегій керування. Витрати енергії на окремих операціях чи ділянках руху поїзду, загальні енергетичні витрати всієї залізничної мережі є значними. Дослідження енергоефективних стратегій керування проведено з використанням теорії оптимального керування для пошуку траєкторій (кривих швидкості), які гарантують безпечну й енергозбережну роботу поїзда. Процес пошуку оптимальної траєкторії швидкості руху називають оптимізацією траєкторії поїзда. Оптимальна траєкторія є основою для оптимізації процесу експлуатації поїздів.

Оптимізація роботи залізниць у першу чергу пов'язана з розробленням графіків і розкладів руху поїздів. Процесу розроблення графіка руху поїздів передують тягові розрахунки. Проблеми розроблення розкладу руху поїздів є складними для великомасштабних транспортних мереж. Якість режиму руху поїзда та його графіка безпосередньо впливає на вартість і якість послуг. Оцінка графіка за стабільністю

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

й пунктуальністю його реалізації у великомасштабній залізничній мережі є дуже вартісною й трудомісткою процедурою. Ідеальний рух поїздів – це дотримання заздалегідь розробленого графіка, а несподівані події можуть призвести до його порушення. У такому випадку поїзд повинен якомога швидше повернутися до свого графіка з мінімальними затратами, щоб уникнути конфліктів з іншими поїздами.

Оптимальне керування складається з послідовності руху в режимі тяги, вибігу, гальмування й оптимальних координат, їх зміни (перемикання) з урахуванням усіх наявних обмежень. Додатковими обмеженнями можуть бути час прибуття (відправлення), час або швидкість проходження через проміжні станції й конфліктні місця на перегонах і роздільних пунктах. Також траєкторію поїзда обмежують деякі часові й швидкісні параметри щодо розміщення сигналізації. Наприклад, певні проміжки часу між суміжними поїздами потрібні для спрацювання сигналів, які необхідні для дотримання безпеки руху. Так, жовті сигнали обов'язково вимагають, щоб поїзд зменшив свою швидкість. Не менш важливим критерієм оптимізації за умови затримки поїзда є зменшення часу затримки, відповідно, і споживання енергії.

Основний недолік наявних класичних методів оптимального керування полягає в тому, що вони вимагають значного часу на обчислення через труднощі з пошуком оптимальних точок

перемикання. На складність обчислення впливають обмеження швидкості й розрахунок градієнтів. Формування оптимального керування в реальних умовах вимагає розроблення більш ефективних методів.

Числові експерименти. Приклади розв'язування задач. Маршрут прямування поїзда будемо задавати як послідовність роздільних пунктів. Для кожного поїзда будемо вважати, що його початкова й кінцева швидкості є нульовими. Об'єкт «поїзд» можна задати, якщо є відомим такий набір параметрів: початкова й кінцева станції; перелік типів локомотивів; кількість вагонів; сумарна чи повагонна маса вантажу тощо. Уважатимемо також відомими параметри зовнішніх умов: температуру й густину повітря, напрям вітру й ін.

Для прокладання шляхів на граф-схемі мережі залізниць реалізовано відомі фундаментальні алгоритми на графах – пошук оптимального маршруту за заданим критерієм і заданою вагою ребер і вершин.

Приклад 1. Прокладання траєкторії руху поїзда через вузлові станції Львівського вузла.

Відмінність маршрутів на схемах (рис. 4) пов'язана зі спеціалізацією колій. Так, дільниця колії від станції Скнилів до стрілочного перевалу № 44 станції Львів дозволяє рух поїздів тільки в парному напрямку, що унеможлиблює її включення в маршрут дільниці Підбірці–Комарне.

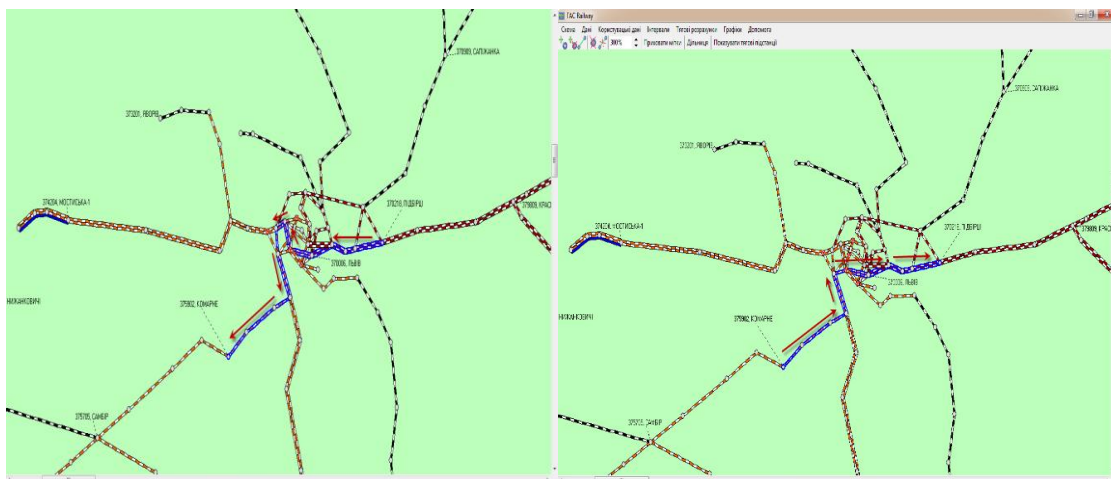


Рис. 4. Найкоротший маршрут між станціями Підбірці й Комарне:
а – від Підбірців до Комарного; б – від Комарного до Підбірців

Fig. 4. The shortest route between Pidbirtsi and Komarne:
a – from Pidbirtsi to Komarne; b – from Komarne to Pidbirtsi

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Приклад 2. Розрахунок режиму ведення вантажного поїзда. Візьмемо ділянку Ковель–Сарни–Коростень і склад поїзда – 57 порожніх піввагонів, тяговий локомотив – тепловоз серії 2М62. Основні умови ведення поїзда:

- відправлення з транзитного парку станції Ковель із бічної колії;
- прямування із зупинкою на станції Сарни;
- прибуття із зупинкою на станції Коростень;

– швидкість руху – розрахункова для графіка руху поїздів на 2018 рік.

Для першого варіанта розрахунок буде проведено для прямування за умови мінімального часу перебування поїзда на перегоні, у дугому візьмемо режим максимального використання холостого ходу з пригальмовуванням на спусках.

На рис. 8–9 наведено режим руху поїзда за мінімальний час, а на рис. 10–11 – режим руху поїзда за час, що на 5 хв більший за мінімальний.

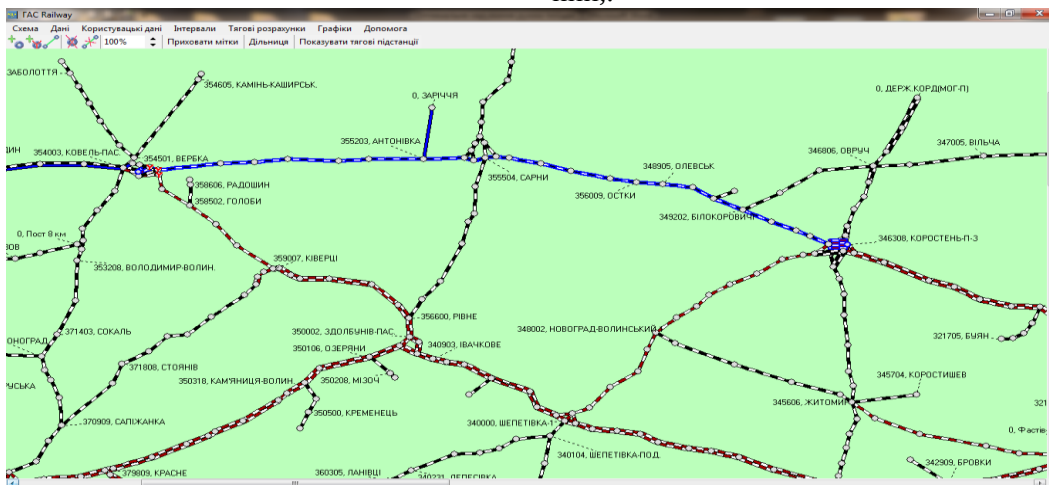


Рис. 5. Вибір ділянки розрахунку на полігоні

Fig. 5. Selection of the calculation section at the operating domain

Назва пункту	Координата	Зупинка	тривалість (хв)	Гол. колія	Пункти перевірки гальм
ВЕЛИКИЙ ЛІС	279829	☐	0	☐	☐
КЛОЧКИ	284739	☐	0	☒	☐
КУПИЩЕ	286729	☐	0	☐	☐
КОЖУХІВКА	289729	☐	0	☐	☐
ЧИПИЛІ	291429	☐	0	☐	☐
ПОСТ-ПІВДЕННИЙ	291863	☐	0	☐	☐
КОРОСТЕНЬ-П-З	295517	☒	0	☐	☐

№	Назва	Кількість	Маса	Піввагонні генератори
1	2М62	1	240 (240)	☐
2	піввагон	57	1254 (22)	☐

Рис. 6. Задання складу поїзда й умов прямування на ділянці у вікні «Розрахунок графіка руху поїзда» модуля «Тягові розрахунки» програмного комплексу ГАС «Railway»

Fig. 6. Train formation and the conditions of running along the section in the «Calculation of train movement» window, «Traction calculations» module of the GAS «Railway» software complex

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Параметри розрахунку

Пасажирський
Вантажний
Приміський
Швидкісний пасажирський
Швидкісний вантажний

Алгоритм: Розгін до максимальної швидкості та її підтримування

Критерій: Мінімум часу

Крок (м): 100

Запас швидкості при нульовому прискоренні (м/с): 0.3

Швидкість, при якій починається гальмування при пізньому гальмуванні (км/год): 40

Мінімальна швидкість, при якій починається гальмування при пізньому гальмуванні (км/год): 15

Мінімальне прискорення при русі на ходових позиціях (м/с²): 0.05

Швидкість при якій припиняється режим початку руху (км/год): 10

Коридор для максимальної швидкості: 0.15

Мінімальна довжина піку обмежень швидкості (м): 1000

☒ Розраховувати розгони та гальмування
☐ для платформ

☐ Можливість підтримувати сталу швидкість при гальмуванні на спуску

Допустима швидкість за замовчуванням: 60

☒ Враховувати ізоляційні стики

Гаразд Скасувати

Рис. 7. Формування параметрів для тягово-енергетичних розрахунків

Fig. 7. Formation of parameters for traction-energy calculations

Результати розрахунку

ГрафікТаблицяРозклад

Зберегти таблицюСтворити форму ЦДЛ-3Створити форму попередженьРозрахувати економію енергії при збільшенні часу ходуПеревірити гальмВитратиВідрізки тягових підстанцій

назва роздільний пункт	координата			план - профіль	розрахунок руху						енергетика		
	поч. (м)	кінц. (м)	узил		Р кривої (м)	V макс. (км/год)	V (км/год)	шлях (м)	час (с)	стан	струм (А)	витрата палива (кг/хв)	температура (°C)
0. КОВЕЛЬ ТРАНЗ.ПАРК	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	5	75	0	1400	40	6.28	5	5.73	Тяга; Позиція 11-ПП	4471.88	7.819	16.47	15.39
175	175	0	0	40	24.19	75	22.26	Тяга; Позиція 15-ПП	3148.29	11.599	16.92	16.92	16.95
185	185	0	0	40	32.25	175	35.02	Тяга; Позиція 15-ПП	2657.85	11.6	16.95	17.02	17.41
211	211	2.4	0	40	32.75	185	36.13	Тяга; Позиція 15-ПП	2633.65	11.6	17.02	17.64	18.09
311	311	2.4	0	40	34	211	38.93	Тяга; Позиція 13-ОП1	3161.15	10.38	17.41	18.09	18.45
381	381	2.4	0	40	37.91	311	48.95	Тяга; Позиція 13-ОП1	3016.34	10.38	17.64	18.75	18.95
405	405	3.6	0	40	40	381	55.41	Тяга; Позиція 5-ПП	1037.91	2.965	17.65	18.94	19.06
505	505	3.6	0	40	39.93	405	57.58	Тяга; Позиція 5-ПП	1040.34	2.969	17.68	19.3	19.53
605	605	3.6	0	40	39.61	505	66.63	Тяга; Позиція 5-ПП	1050.78	2.99	17.72		
655	655	3.6	0	40	39.12	605	75.78	Тяга; Позиція 5-ПП	1066.6	3.022	17.74		
755	755	-0.3	0	40	38.83	655	80.39	Тяга; Позиція 5-ПП	1076.12	3.041	17.78		
855	855	-0.3	0	40	38.2	755	89.74	Тяга; Позиція 5-ПП	1086.59	3.081	17.83		
955	955	-0.3	0	40	37.78	855	99.22	Тяга; Позиція 5-ПП	1109.71	3.108	17.87		
1055	1055	-0.3	0	40	37.38	955	108.8	Тяга; Позиція 5-ПП	1121.01	3.133	17.92		
1155	1155	-0.3	0	40	37.02	1055	118.47	Тяга; Позиція 5-ПП	1131.57	3.157	17.97		
1255	1255	-0.3	0	40	36.7	1155	128.24	Тяга; Позиція 5-ПП	1140.6	3.177	18.02		
1385	1385	-0.3	1600	40	36.5	1255	138.08	Тяга; Позиція 5-ПП	1146.4	3.19	18.04		
1390	1390	-1.7	1600	40	36.47	1385	141.04	Тяга; Позиція 5-ПП	1147.16	3.191	18.09		
1490	1490	-1.7	0	40	36.44	1390	150.91	Тяга; Позиція 4-ПП	922.11	2.32	18.09		
1505	1505	-1.7	0	40	36.43	1390	151.41	Тяга; Позиція 4-ПП	922.21	2.32	18.11		
1595	1595	-0.8	0	40	36.36	1490	161.3	Тяга; Позиція 3-ПП	737.76	1.641	18.11		
1625	1625	-0.8	0	40	36.34	1505	162.78	Тяга; Позиція 3-ПП	737.91	1.641	18.1		
1630	1630	4.2	0	40	36.19	1595	171.72	Тяга; Позиція 3-ПП	738.78	1.643	18.1		
1684	1684	4.2	-500	40	36.13	1625	174.71	Тяга; Позиція 3-ПП	739.08	1.644	18.1		
1734	1734	4.2	-500	40	36.12	1630	175.2	Тяга; Позиція 3-ПП	739.13	1.644	18.09		
1834	1834	4.2	-500	40	36.03	1684	180.59	Тяга; Позиція 4-ПП	933.74	2.326	18.11		
1934	1934	4.2	-500	80	35.32	1734	185.6	Тяга; Позиція 13-ОП1	3053.38	10.38	18.45		
1970	1970	4.2	-500	80	39.35	1834	195.16	Тяга; Позиція 13-ОП1	2950.55	10.38	18.75		
2005	2005	6.2	0	80	42.01	1934	204.01	Тяга; Позиція 13-ОП1	2829.91	10.38	18.95		
2050	2050	6.2	0	80	42.79	1970	207.07	Тяга; Позиція 13-ОП1	2807.07	10.38	18.94		
2090	2090	6.2	-380	80	43.69	2005	209.99	Тяга; Позиція 13-ОП1	2786.58	10.38	19.06		
2150	2150	6.2	-380	80	44.34	2050	213.68	Тяга; Позиція 13-ОП1	2762.09	10.38	19.3		
2250	2250	6.2	-380	80	45.92	2150	221.65	Тяга; Позиція 13-ОП1	2715.88	10.38	19.53		

Час ходу (хв): 264.81

Загальні витрати електроенергії (кВт.год): 27456.18

Загальні витрати палива (т): 2.32

Основа - додаткова тяга

Закрити

Рис. 8. Результати першого варіанта тягово-енергетичного розрахунку
ведення поїзда на ділянці Ковель–Сарни–КоростеньFig. 8. Results of the first option of the traction-energy calculation in the train
running on the Kovel-Sarny-Korosten section

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

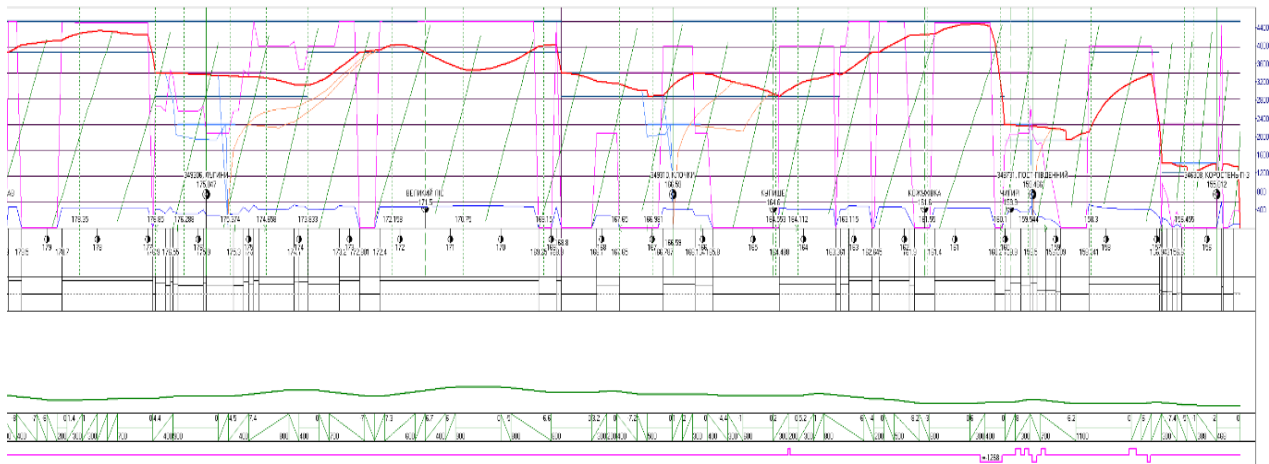


Рис. 9. Графічний фрагмент розрахункової режимної карти ведення поїзда на дільниці Ковель–Сарни–Коростень за першим варіантом

Fig. 9. Graphic fragment of the calculated mode map in the train running on the Kovel-Sarny-Korosten section by the first option.

Результати розрахунку

Перейти на іншу форму

ГрафікТаблицяРозклад

Зберегти таблицю

Створити форму ЦДЛ-3

Створити форму попереджень

Розрахувати економію енергії при збільшенні часу ходу

Перевірити гальм

Витрати

Відіраїти тягових підстанцій

назва	роздільний пункт		координата	швид.	план - профіль		розрахунок руху				енергетика		
	поч. (м)	кінець (м)			Р кривої (м)	V макс. (км/год)	V (км/год)	шлях (м)	час (с)	стан	струм (А)	витрата палива (кг/хв)	температура (°C)
0. КОВЕЛЬ ТРАНЗ.ПАРК	0	5	2.2	1400	40	0	0	0	0	Тяга; Позиція: 11-ПП	4525	6.74	15.39
	5	75	0	1400	40	5.28	5	5.73	Тяга; Позиція: 11-ПП	4471.88	7.819	16.47	
	75	175	0	0	40	24.19	75	22.26	Тяга; Позиція: 15-ПП	3148.29	11.593	16.92	
	175	185	0	0	40	32.25	175	35.02	Тяга; Позиція: 15-ПП	2857.95	11.6	16.95	
	185	211	2.4	0	40	32.75	185	36.13	Тяга; Позиція: 15-ПП	2633.65	11.6	17.02	
	211	311	2.4	0	40	34	211	38.93	Тяга; Позиція: 13-ОП1	3161.15	10.38	17.41	
	311	381	2.4	0	40	37.91	311	48.95	Тяга; Позиція: 13-ОП1	3016.34	10.38	17.64	
	381	405	2.4	0	40	40	381	55.41	Холостий хід	0	0	17.63	
	405	505	3.6	0	40	39.7	405	57.58	Холостий хід	0	0	17.62	
	505	605	3.6	0	40	38.39	505	66.8	Холостий хід	0	0	17.6	
	605	655	3.6	0	40	36.88	605	76.37	Холостий хід	0	0	17.59	
	655	755	-0.3	0	40	36.05	655	81.3	Холостий хід	0	0	17.57	
	755	773	-0.3	0	40	34.29	755	91.54	Холостий хід	0	0	17.57	
	773	873	-0.3	0	40	34	773	93.44	Тяга; Позиція: 13-ОП1	3161.15	10.38	17.96	
	873	961	-0.3	0	40	37.57	873	103.5	Тяга; Позиція: 13-ОП1	3032.1	10.38	18.25	
	961	1061	-0.3	0	40	40	961	111.67	Холостий хід	0	0	18.23	
	1061	1161	-0.3	0	40	38.52	1061	120.84	Холостий хід	0	0	18.21	
	1161	1255	-0.3	0	40	37.06	1161	130.36	Холостий хід	0	0	18.19	
	1255	1285	-0.3	1600	40	35.77	1255	139.66	Холостий хід	0	0	18.18	
	1285	1385	-1.7	1600	40	35.38	1285	142.63	Холостий хід	0	0	18.16	
	1385	1390	-1.7	1600	40	34.12	1385	153.05	Холостий хід	0	0	18.16	
	1390	1398	-1.7	0	40	34.07	1390	153.58	Холостий хід	0	0	18.16	
	1398	1498	-1.7	0	40	34	1398	154.43	Тяга; Позиція: 13-ОП1	3161.15	10.38	18.54	
	1498	1505	-1.7	0	40	38.17	1498	164.4	Тяга; Позиція: 13-ОП1	3004.54	10.38	18.56	
	1505	1552	-0.8	0	40	38.42	1505	165.06	Тяга; Позиція: 13-ОП1	2933.37	10.38	18.71	
	1552	1595	-0.8	0	40	40	1552	169.38	Холостий хід	0	0	18.7	
	1595	1625	-0.8	0	40	39.67	1595	173.26	Холостий хід	0	0	18.69	
	1625	1630	4.2	0	40	39.43	1625	175.99	Холостий хід	0	0	18.69	
	1630	1684	4.2	-500	40	39.4	1630	176.45	Холостий хід	0	0	18.68	
	1684	1734	4.2	-500	40	38.98	1684	181.41	Холостий хід	0	0	18.67	
	1734	1834	4.2	-500	80	38.44	1734	186.06	Тяга; Позиція: 13-ОП1	2992.36	10.38	18.98	
	1834	1934	4.2	-500	80	41.38	1834	195.08	Тяга; Позиція: 13-ОП1	2857.95	10.38	19.25	
	1934	1970	4.2	-500	80	43.76	1934	203.54	Тяга; Позиція: 13-ОП1	2778.81	10.38	19.34	

Час ходу (хв): 269.87

Загальні витрати електроенергії (кВт.год): 24773.96

Загальні витрати палива (т): 2.204

Основа - додаткова тяга

Закрити

Час ходу (хв): 269.87

Загальні витрати електроенергії (кВт.год): 24773.96

Загальні витрати палива (т): 2.204

Рис. 10. Результати другого варіанта тягово-енергетичного розрахунку ведення поїзда на дільниці Ковель–Сарни–Коростень

Fig. 10. Results of the second option of the traction-energy calculation in the train running on the Kovel-Sarny-Korosten section

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

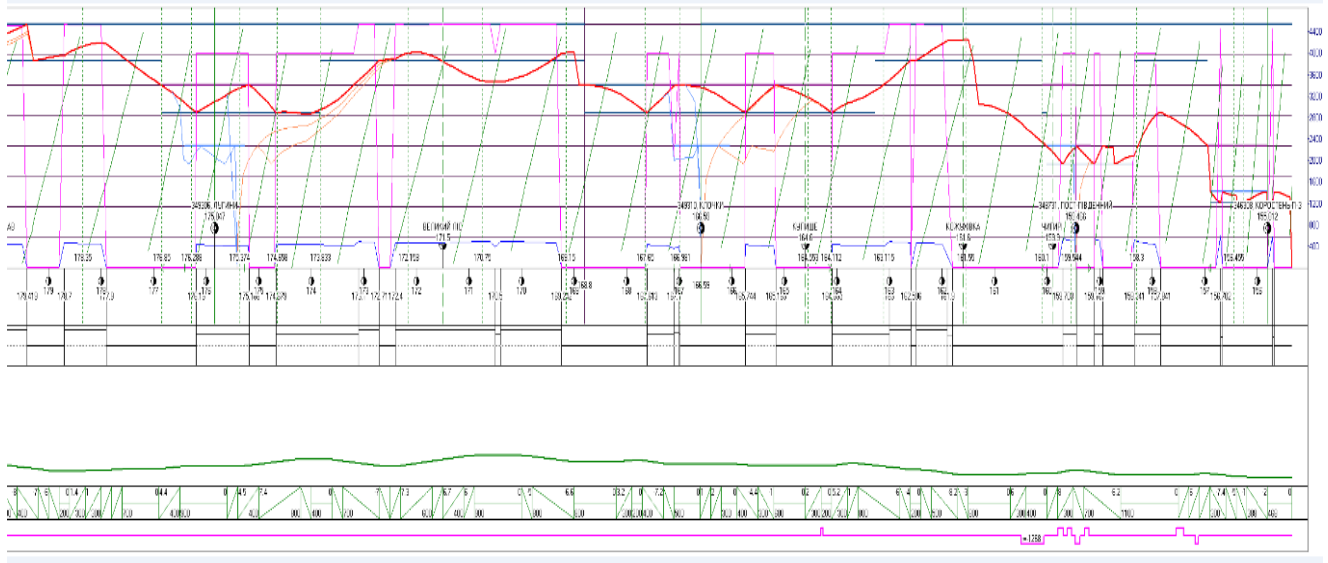


Рис. 11. Графічний фрагмент розрахункової режимної карти ведення поїзда на дільниці Ковель–Сарни–Коростень за другим варіантом

Fig. 11. Graphic fragment of the calculated mode map in the train running on the Kovel-Sarny-Korosten section by the second option.

У першому випадку розрахунковий час прямування поїзда без урахування часу стоянки складає 272 хв, витрата дизельного палива на тягу поїзда – 2 350 кг. У другому варіанті розрахунковий час прямування поїзда без урахування часу стоянки складає 277 хв, витрата дизельного палива на тягу поїзда – 2 260 кг. У цьому випадку збільшення часу руху поїзда на дільниці на 5 хв забезпечує економію в 90 кг дизельного палива.

Приклад 3. Розрахунок часу на рух та мінімальних паливно-енергетичних витрат із різними типами локомотивів. Задано параметри: початкова станція – Жмеринка, кінцева –

П'ятихатки–Стикова, склад поїзда – 50 піввагонів по 40 т, локомотиви – ВЛ-80 і М62.

Розглянемо два варіанти.

Варіант 1. Найкоротший шлях між станціями Жмеринка й П'ятихатки–Стикова можна забезпечити рухом: на змінному струмі між станціями Жмеринка–Вапнярка, на тепловозній тязі між станціями Вапнярка–Цвіткове, та на змінному струмі між станціями Цвіткове–П'ятихатки–Стикова.

Результат моделювання: час на переміщення – 591 хв (64+330+196); вартість енерговитрат – 14 648 грн (1 365+9 130+4 153).

Витрати			
Поїзд	Шлях (км)	Час (хв)	Витрати на тягу
Жмеринка - Вапнярка	77,819	64,4	1 364,92 грн.
Вапнярка - Цвіткове	267,575	330,1	9 130,36 грн.
Цвіткове - П'ятихатки-Стикова	227,23	196,4	4 152,60 грн.
	572,62	590,90	14647,88

Рис. 12. Розрахунок часу й витрат (у грн) на переміщення поїзда в разі використання комбінованої тяги

Fig. 12. Calculation of time and expenses (in UAH) for the train movement in case of combined traction usage

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Варіант 2. Найкоротший шлях для електричної тяги змінного струму між станціями Жмеринка–П'ятихатки–Стикова пролягає через Фастів.

Результат: час на переміщення – 514 хв; вартість енерговитрат – 10 311 грн.

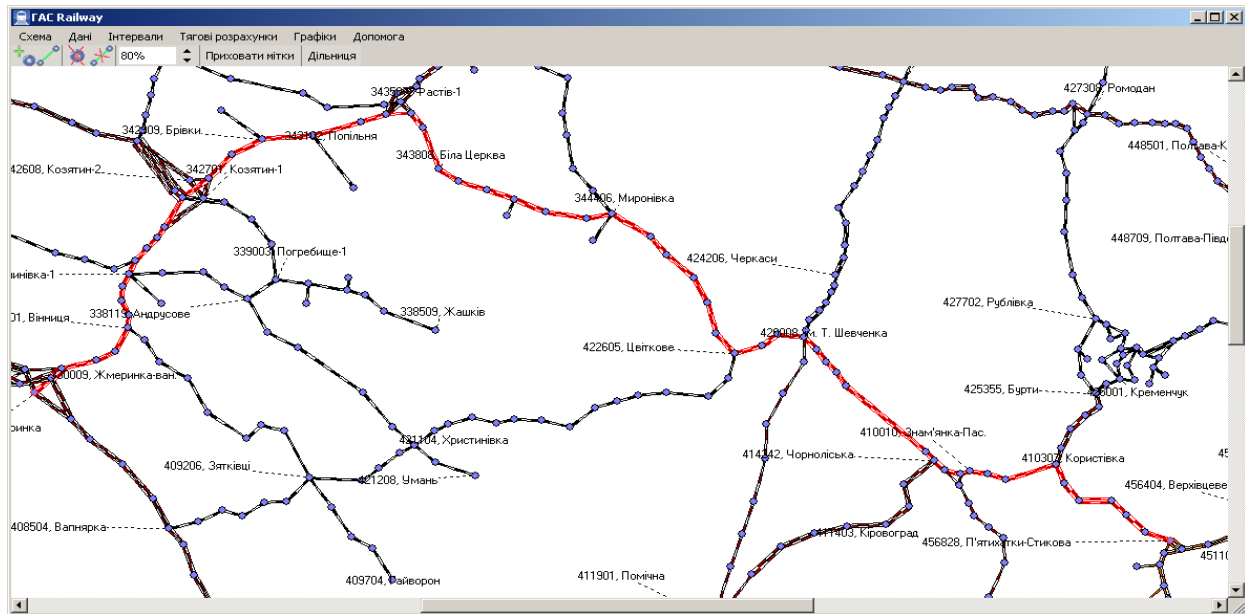


Рис. 13. Знаходження найкоротшого шляху для певного виду тяги

Fig. 13. Finding the shortest track for a particular type of traction

Витрати			
Поїзд	Шлях (км)	Час (хв)	Витрати на тягу
Жмеринка - П'ятихатки-Стикова	607,803	513,6	10 311,20 грн.
	607,80	513,60	10311,20

Рис. 14. Розрахунок часу й витрат на переміщення поїзда

Fig. 14. Calculation of time and expenses for the train movement

Шлях між станціями електровоз змінного струму пройде швидше і з меншими на 42 % затратами у гривнях на енергетичні ресурси.

Приклад 4. Розрахунок витрат на тягу поїзда на дільниці Мостиська–Львів–Красне–Рівне–Сарни. На граф-схемі (рис. 15) можна виділити три дільниці, які відрізняються типом тягового електропостачання. Так, на дільниці Мостиська–Львів колії електрифіковано постійним струмом напругою 3 кВ. На дільниці

Львів–Красне–Рівне діє система тягового електропостачання змінного струму напругою 27 кВ, а дільниці колій Рівне–Сарни неелектрифікована.

Розрахунок на дільницях проведемо для попередньо визначеного складу поїзда й заданих серій локомотивів. У результаті отримуємо відстань, час ходу, витрати на тягу поїзда, сумарні витрати на ведення й організацію пропускання поїздів із розподілом по дільницях.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

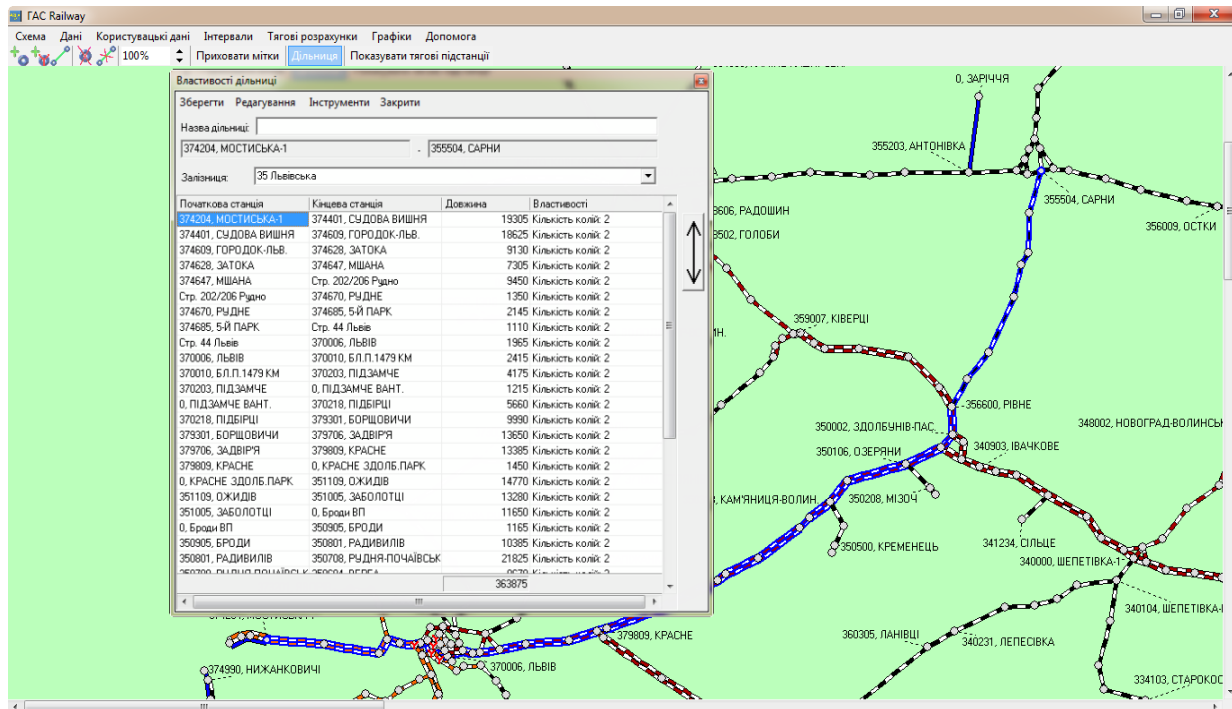


Рис. 15. Дільниця Мостиська–Львів–Красне–Рівне–Сарни

Fig. 15. Mostyska-Lviv-Krasne-Rivne-Sarny section

Поїзд	Шлях (км)	Час (хв)	Витрати на тягу	Витрати за ставками
МОСТИСЬКА-1 - ЛЬВІВ	70.385	66.2	2 059.95?	6 190.36?
ЛЬВІВ - РІВНЕ	206.41	185.7	4 818.23?	18 153.76?
РІВНЕ - САРНИ	87.085	84.4	5 368.80?	9 194.43?
	363.88	336.30	12246.98	33538.55

Рис. 16. Вартість енергетичних та за витратними ставками на тягу поїзду

Fig. 16. Cost of energy and the expense of traction train

У наш час правління Укрзалізниці вивчає можливість закупівлі нових локомотивів. Для цього аналізують їх тягові й струменеві характеристики. Для прикладу, на рис. 17 наведено номінальні тягові й струменеві характеристики локомотивів двох фірм – Alstom (робоча назва Альстом 8 (UA)) й KHP (назва

БКГ–2 – адаптація (китайського) електровоза серії HXD2 виробництва для Республіки Білорусь).

Високу якість локомотивів із наведеними тягово-струменевими параметрами характеризує пропорційний зв'язок між величинами струму, силою тяги й швидкістю руху.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

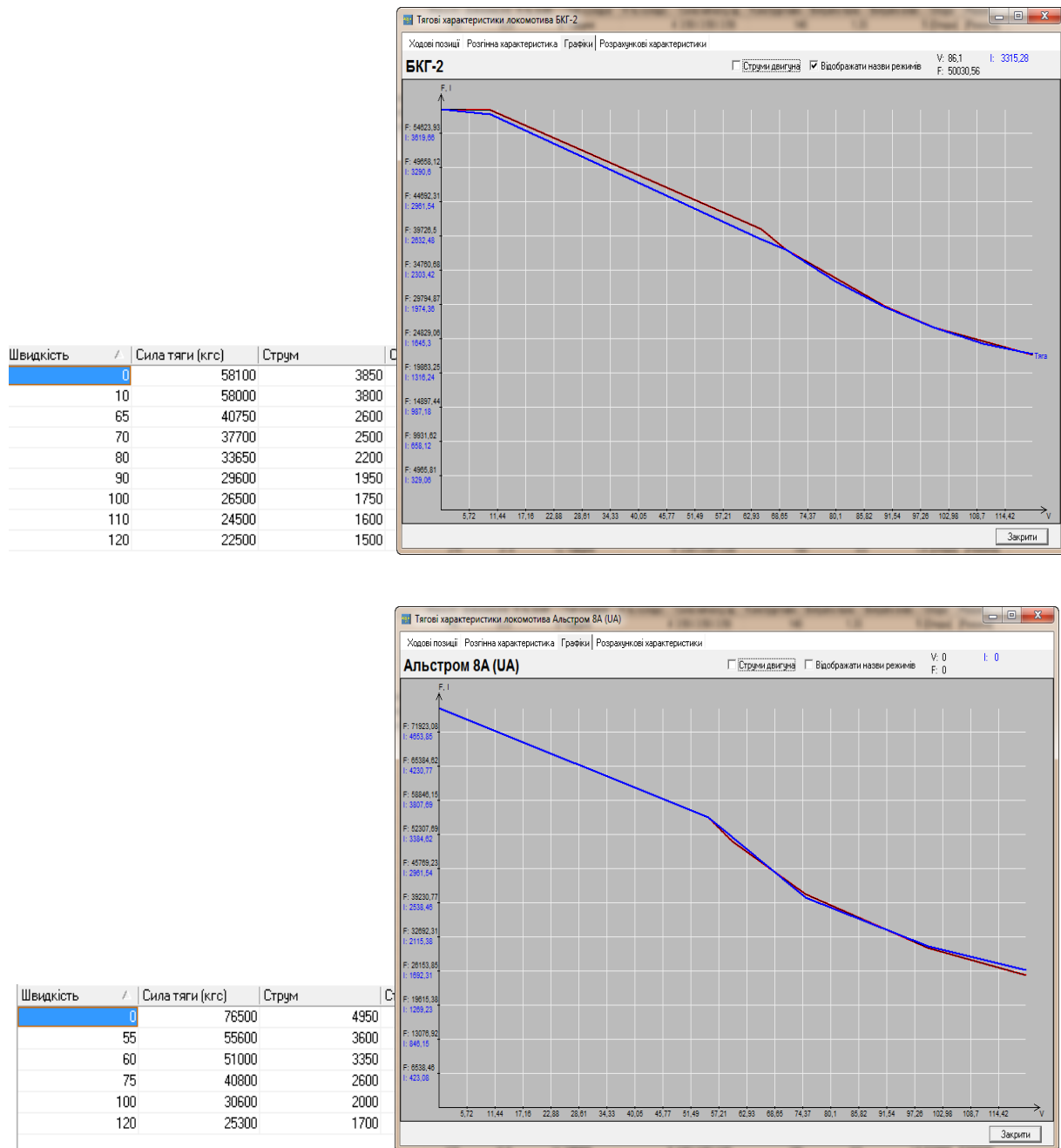


Рис. 17. Тягові й струменеві характеристики локомотивів:
а – БКГ-2; б – Альстром 8 UA

Fig. 17. Traction and jet characteristics of locomotives:
а – BKG-2; б – Alstrom 8 UA

Приклад 5. Дослідження номінальних та екстремальних техніко-економічних властивостей нових перспективних локомотивів для залізниці України.

Дослідження проведено засобами моделювального комплексу у складі вантажних поїздів на дільниці П'ятихатки–Миронівка. Розрахункова швидкість (взята для цієї категорії дільниці) – 55 км/год. За визначенням, розрахункова швид-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

кість – шлях, який проходить повноваговий поїзд на розрахунковому підйомі за 1 год й повного використання потужності локомотива. Розрахунковий підйом – це найбільш важкий для руху в цьому напрямку елемент профілю колії, на якому досягається розрахункова швидкість, що відповідає розрахунковій силі тяги локомотива. Досить довгий і найбільш крутий підйом ділянки беремо за розрахунковий.

У прикладі 5 використано параметри: склад поїзда – 70 вагонів; навантаження – критична вага. На рис. 18 графічні залежності наведено для поїздів із різними типами локомотивів і маси (у правому куточках зверху та знизу). Розраховані максимальні маси наведено зліва у верхньому кутку. Розрахунок показав, що для локомотива фірми Skoda (робоча назва Шкода-8) склад поїзда за вагою може бути більшим.

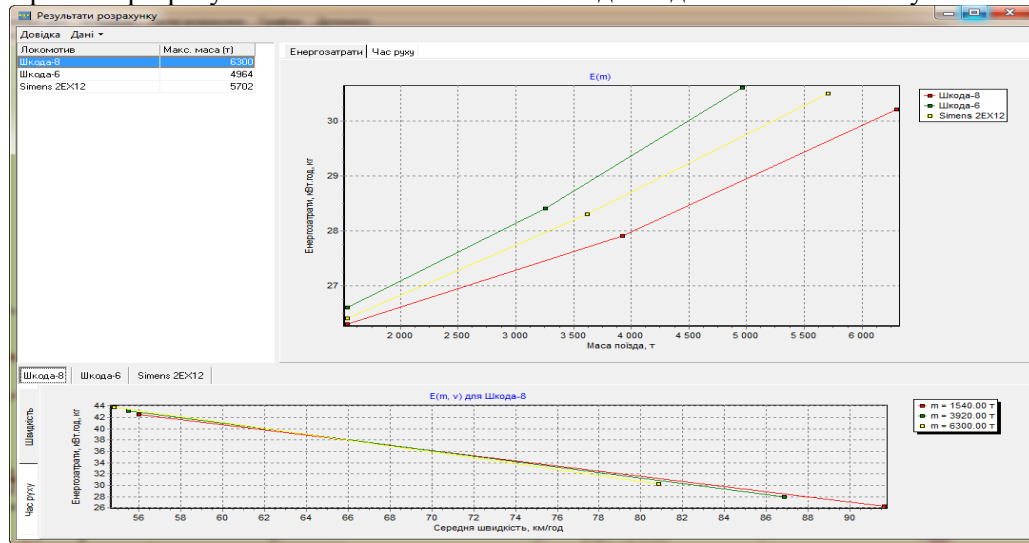


Рис. 18. Результати дослідження енергозатрат як функцій маси і швидкості поїздів на ділянці П'ятихатки–Миронівка

Fig. 18. Results in the research of energy costs as functions of mass and speed of trains at the Piatykhatty-Mironovka section

Аналогічні дослідження проведено для інших локомотивів – БКГ–2, Альстом 8А (UA) тощо.

Приклад 6. Знаходження критичних ухилів. Визначено складні для ведення поїзда ділянки

П'ятихатки–Знам'янка Знам'янка–Миронівка

колії – перегони з максимальним значенням ухилу на підйомі (спуску) за довжини ухилу, яка має перевищувати загальну довжину складу поїзда (рис. 19).

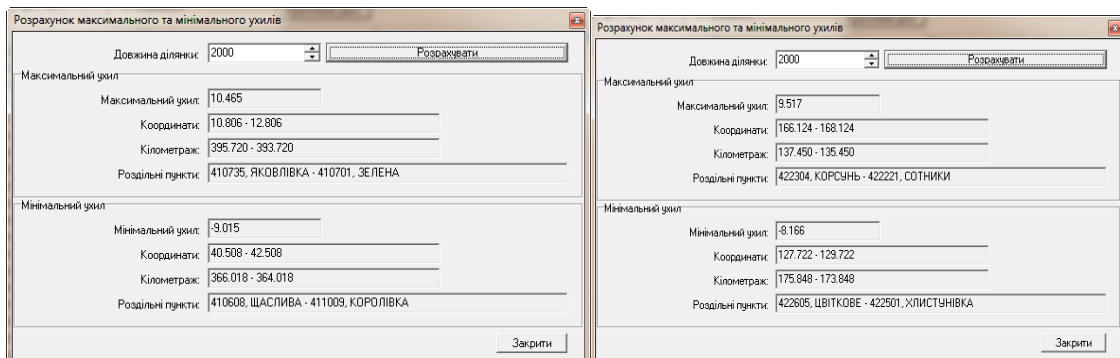


Рис. 19. Результати знаходження екстремальних ухилів

Fig. 19. Results of finding extreme gradients

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Наукова новизна та практична значимість

У роботі запропоновано математичне й програмне забезпечення для: прокладання шляхів за встановленими критеріями оптимальності між виділеними роздільними пунктами; розв'язування режимних задач ведення поїздів із різними типами тяги як задачі оптимального керування рухом на мережі залізниць. У всіх випадках забезпечена автоматизація процесу розв'язування основних режимних задач із різними критеріями оптимальності.

Розроблений програмний комплекс пройшов апробацію і для розрахунку основних складових формування графіків руху, вибору оптимальних параметрів реконструкції полотна й аналізу якісних параметрів руху нових швидкісних локомотивів у складі пасажирських і вантажних поїздів.

Висновки

Мережний варіант тягових розрахунків дає можливість постановки й розв'язання економічних задач, задач формування норма-

тивної бази та проведення числових експериментів для пошуку оптимальних рішень за умови реконструкції полотна, оцінки ефекту від використання нових локомотивів за тягово-енергетичними й ходовими характеристиками тощо.

Розроблений мережний варіант тягових розрахунків забезпечує:

- оптимізацію траєкторії руху поїздів для заданого графіка;
- формування якісних (оптимальних за безпекою, стійкістю й інтегральними ресурсними затратами) графіків руху;
- експлуатацію поїздів за умови оптимального коригування режиму руху у випадках їх затримки (максимально точна реалізація запланованого розкладу);
- інтеграцію тягових, безпекових параметрів на перегонах і роздільних пунктах під час прокладання графіка руху;
- побудову інформаційно-дорадчої системи машиніста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн ; пер. с англ. – 2-е изд. – Москва : Вильямс, 2005. – 1296 с.
2. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – Москва : Мир, 1978. – 432 с.
3. Мугиншейн, Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугиншейн, А. У. Илютович, И. А. Ябло. – Москва : Интекст, 2012. – 80 с.
4. Притула, М. Г. Алгоритм побудови графіка руху поїздів / М. Г. Притула, Р. Р. Шпакович // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології : зб. наук. пр. – Львів, 2008. – № 629. – С. 146–152.
5. Притула, М. Г. Моделювання та розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів / М. Г. Притула, Р. Р. Шпакович // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2007. – Вип. 5. – С. 139–145.
6. Притула, М. Г. Ідентифікація параметрів моделі руху поїзда / М. Г. Притула, Р. Р. Шпакович // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології : зб. наук. пр. – Львів, 2008. – № 629. – С. 105–110.
7. Притула, М. Г. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів / М. Г. Притула, О. А. Пасечник // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 6 (78). – С. 82–100. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641>
8. Комп'ютерне моделювання залізничних транспортних засобів : метод. вказівки до виконання практичних робіт, курсового та дипломного проектування / М. Капіца, Я. Калівода, Л. Недужа, О. Очкасов, Д. Черняєв. – Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2018. – 59 с.
9. Седжвик, Р. Фундаментальные алгоритмы на C++: Алгоритмы на графах / Р. Седжвик ; пер. с англ. – Санкт-Петербург : Диасофт, 2002. – 496 с.
10. Троелсен, Э. C# и платформа .NET 3.0 / Э. Троелсен. – Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 1456 с.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

11. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling / V. Cacchiani, D. Huisman, M. Kidd [et al.] // *Transportation Research. Part B: Methodological*. – 2014. – Vol. 63. – P. 15–37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.01.009>
12. Application of an iterative framework for real-time railway rescheduling / T. Dollevoet, D. Huisman, L. Kroon, L. Veelenturf, J. Wagenaar // *Computers & Operations Research*. – 2017. – Vol. 78. – P. 203–217. doi: doi.org/10.1016/j.cor.2016.08.011
13. Corman, F. A Review of Online Dynamic Models and Algorithms for Railway Traffic Management / F. Corman, L. Meng // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2015. – Vol. 16. – Iss. 3. – P. 1274–1284. doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2358392>
14. Gholamian, S. A. A discrete-event optimization framework for mixed-speed train timetabling problem / S. A. Gholamian // *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*. – 2017. – Vol. 4, No. 2. – P. 64–84.
15. Haahr, J. T. A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points / J. T. Haahr, D. Pisinger, M. Sabbaghian // *Transportation Research. Part B: Methodological*. – 2017. – Vol. 99. – P. 167–182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.12.016>
16. Joint optimization of high-speed train timetables and speed profiles: A unified modeling approach using space-time-speed grid networks / L. Zhou, Lu (Carol) Tong, J. Chen, J. Tang, X. Zhou // *Transportation Research. Part B: Methodological*. – 2017. – Vol. 97. – P. 157–181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.002>
17. Klimenko, I. Parameter optimization of the locomotive running gear / I. Klimenko, J. Kalivoda, L. Neduzha // *Transport Means 2018 : Proceedings of 22nd International Scientific Conference (October 3–5, 2018)* / Kaunas University of Technology. – Trakai, Klaipėda, 2018. – P. 1095–1098.
18. Review of energy efficient train control and timetabling / G. Scheepmaker, M. Gerben, R. Goverde, L. Kroon // *European Journal of Operational Research*. – 2017. – Vol. 257. – Iss. 2. – P. 355–376. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044>
19. Skiena, S. S. *The Algorithm Design Manual* / S. S. Skiena. – London : Springer, 2008. – 730 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-070-4>
20. The key principles of optimal train control. Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points / A. Albrecht, P. Howlett, P. Pudney, X. Vu, P. Zhou // *Transportation Research. Part B: Methodological*. – 2016. – Vol. 94. – P. 482–508. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.023>
21. The key principles of optimal train control. Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques / A. Albrecht, P. Howlett, P. Pudney, X. Vu, P. Zhou // *Transportation Research. Part B: Methodological*. – 2016. – Vol. 94. – P. 509–538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.024>
22. Wang, P. *Train Trajectory Optimization Methods for Energy-Efficient Railway Operations : doctoral thesis [Електронний ресурс]* / P. Wang ; Delft University of Technology. – Delft, 2017. – Режим доступу: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ace04a07d-89fc-470a-9d1a-b6fae9182dae>. – Назва з екрана. – Перевірено : 18.06.2019.
23. Warg, J. The use of railway simulation as an input to economic assessment of timetables / J. Warg, M. Bohlin // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 3. – P. 255–270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.08.001>
24. Ye, H. Nonlinear programming methods based on closed-form expressions for optimal train control / H. Ye, R. Liu // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. – 2017. – Vol. 82. – P. 102–123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.011>

М. Г. ПРИТУЛА^{1*}, А. А. ПАСЕЧНИК^{2*}

^{1*}Центр математического моделирования НАНУ, ул. Дудаева, 15, Львов, Украина, 79053, тел. +38 (032) 261 18 85, эл. почта myroslav.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}ГП «Проектно-конструкторское технологическое бюро по автоматизации систем управления на железнодорожном транспорте Украины», ул. Жилинская, 97, Киев, Украина, 01135, тел. +38 (044) 226 24 82, эл. почта sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ТЯГОВЫЕ ЗАДАЧИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ

Цель. Работа предусматривает разработку информационного и алгоритмического обеспечения для проведения оптимизационных тягово-энергетических расчетов на железнодорожной сети с целью их дальнейшего использования в системах эффективного управления перевозочным процессом. **Методика.** В основе исследования – графоаналитическая система, модель движения поезда с различными типами тяги, методы оптимального управления поездом и фундаментальные алгоритмы на взвешенных графах с возможными параллельными ребрами (дугами). В комплексе эти составляющие системы обеспечивают нахождение на граф-схеме путей по заданным критериям, проведение оптимизационных тягово-энергетических расчетов, а также сравнительного анализа полученных результатов. Достоверность результатов неоднократно проверена имеющимися способами для различной сложности перегонов по плану и профилю трассы. Для этого использованы данные, полученные в результате проведения контрольных поездок с применением динамометрических вагонов, а также проведен сравнительный анализ режимов работы поездов, рассчитанных и полученных квалифицированными машинистами на различных перегонах. **Результаты.** Рассмотрена проблема эффективной эксплуатации различных типов и модификаций локомотивов, задействованных в реализации графиков движения поездов различного назначения и нагрузки. Приведена постановка прямых и обратных оптимизационных, по различным критериям, режимных задач на железнодорожной сети и варианты их эффективного решения. Приведен анализ результатов разработанного математического обеспечения и идеи реализованных алгоритмов. **Научная новизна.** В работе предложена постановка сетевых оптимизационных задач, возникающих на этапах разработки плана формирования поездов, построения графиков движения, оценки пропускной способности, расчета оптимальных параметров составляющих графиков движения и др. Важным является системный подход, который обеспечил сочетание разработанной модели сети в универсальных терминах теории графов с системой актуализации их параметров. Тягово-энергетические расчеты проведены методами комбинаторной оптимизации, что обеспечило максимальный уровень автоматизации процесса решения большого набора прямых и обратных режимных задач с различными критериями оптимальности. **Практическая значимость.** Разработано информационное и алгоритмическое обеспечение для автоматизации процесса решения прямых и обратных режимных тягово-энергетических задач на железнодорожной сети, которое прошло апробацию в процессе расчета основных составляющих для формирования графиков движения, анализа режимов ведения поездов, оценки выбора оптимальных параметров реконструкции путевого полотна для скоростных и новых типов поездов (локомотивов).

Ключевые слова: тяговые расчеты; железнодорожная сеть; фундаментальные алгоритмы; режим движения; оптимальный режим; график движения; безопасность движения; математическое обеспечение

М. Г. PRYTULA^{1*}, О. А. PASECHNYK^{2*}

^{1*}Center of Mathematical Modelling NASU, Dudaev St., 15, Lviv, Ukraine, 79053, tel. +38 (032) 261 18 85, e-mail myroslav.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}SE «Design and Development Bureau of Automation of Control Systems in the Railway Transport of Ukraine», Zhylianska St., 97, Kyiv, Ukraine, 01135, tel. +38 (044) 226 24 82, e-mail sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

OPTIMIZATIONAL TRACTION TASKS ON THE RAILWAY NETWORK

Purpose. The paper involves the development of information and algorithmic support for conducting the optimization traction and energy calculations on the railway network for their further use in decision-making systems – systems for efficient management of the transport process. **Methodology.** The system is based on the graph-analytic system, the model of the train with different types of traction, the methods of optimal control of the train and the fundamental algorithms on the weighted graphs with possible parallel ribs (arcs). In the complex, these components of the system provide finding the tracks on the chart-diagram according to the given criteria, conducting the optimization traction-energy calculations according to different criteria, as well as conducting a comparative analysis of the obtained results. The reliability of the results has been repeatedly checked by available methods for varying complexity of race according to the plan and profile of the course. For this purpose, data obtained as a result of control visits using dynamometric cars were used. Also a comparative analysis of the modes in operation of trains, calculated and received by qualified drivers on different races was conducted. **Findings.** The problem of efficient oper-

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/171774>

© М. Г. Пригула, О. А. Пасечник, 2019

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ation of various types and modifications of locomotives, involved in the implementation of trains schedules for different purposes and loads is considered. Presentations of direct and inverse optimization, according to various criteria, of the regime tasks on the railway network and variants of their effective solution are given. The analysis of the results of the developed mathematical support and the ideas of implemented algorithms is given. **Originality.** The paper proposes the establishment of the network optimization problems that arise at the stages of the developing the plan for the formation, construction of traffic schedules, transmission capacity assessment and the calculation of optimal parameters for the composite graphs of motion, etc. The system approach is important to ensure the combination of the developed network structure in the universal terms of the graph theory with the system of actualization of their parameters. Pull and energy efficiency calculations are carried out by combinatorial optimization methods, which ensured the maximum level of automation of the process in solving a large set of direct and inverse regime problems with different optimality criteria. **Practical value.** The information and algorithmic support for the automation of the process in solving the direct and reverse regime traction-energy problems on the railway network was developed. It was tested in the process of calculating the main components for the formation of traffic schedules, analysis of train driving modes, assessment in choosing the optimal parameters of the track reconstruction for high-speed and new types of trains (locomotives).

Keywords: traction calculations; railway network; fundamental algorithms; mode of movement; optimal mode; schedule; traffic safety; mathematical support

REFERENCES

1. Kormen, T. K., Leyzerson, C. I., Rivest, R. L., & Shtayn, K. (2011). *Algoritmy: Postroenie i analiz*. Moscow: Williams. (in Russian)
2. Kristofides, N. (1978). *Teoriya grafov. Algoritmicheskiy podkhod*. Moscow: Mir. (in Russian)
3. Muginsheyn, L. A., Ilyutovich, A. U., & Yabko, I. A. (2012). *Energooptimalnye metody upravleniya dvizheniem poezdov*. Moscow: Intext. (in Russian)
4. Prytula, M. H., & Shpakovych, R. R. (2008). Alhorytm pobudovy hrafika rukhu poizdiv. *Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic». Series: Computer Science and Information Technologies*, 629, 146-152. (in Ukrainian)
5. Prytula, M. H., & Shpakovych, R. R. (2007). Modeliuvannia ta rozrakhunok optymalnykh parametriv rukhu poizdiv. *Physical-mathematical modeling and information technologies*, 5, 139-145. (in Ukrainian)
6. Prytula, M. H., & Shpakovych, R. R. (2008). Identyfikatsiia parametriv modeli rukhu poizda. *Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic». Series: Computer Science and Information Technologies*, 629, 105-110. (in Ukrainian)
7. Prytula, M. G., & Pasechnyk, O. A. (2019). Development of the algorithms formation of energy-optimized trains traffic modes. *Science and Transport Progress*, 6(78), 82-100. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641> (in Ukrainian)
8. Kapitsa, M. I., Kalivoda, J., Neduzha, L. O., Ochkasov, O. B., & Chernyayev, D. V. (2018). *Komp'yuterne modelyuvannya zaliznichnikh transportnikh zasobiv: metodychni vkazivky do vykonannya praktychnykh robit, kursovoho ta diplomnoho proektuvannia*. Dnipro. (in Ukrainian)
9. Sedzhvik, R. (2002). *Fundamentalnye algoritmy na S++: Algoritmy na grafakh*. St. Petersburg: Diasoft. (in Russian)
10. Troelsen, E. (2008). *S# i platforma. NET 3.0*. St. Petersburg: Piter. (in Russian)
11. Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., Toth, P., Veelenturf, L., & Wagenaar, J. (2014). An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 63, 15-37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.01.009> (in English)
12. Dollevoet, T., Huisman, D., Kroon, L. G., Veelenturf, L. P., & Wagenaar, J. C. (2017). Application of an iterative framework for real-time railway rescheduling. *Computers & Operations Research*, 78, 203-217. doi: [doi: 10.1016/j.cor.2016.08.011](https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.08.011) (in English)
13. Corman, F., & Meng, L. (2015). Review of Online Dynamic Models and Algorithms for Railway Traffic Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), 1274-1284. doi: <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2358392> (in English)
14. Gholamian, S. A. (2017). A discrete-event optimization framework for mixed-speed train timetabling problem. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 4(2), 64-84. (in English)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

15. Haahr, J., Pisinger, D., & Sabbaghian, M. (2017). A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 99, 167-182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.12.016> (in English)
16. Zhou, L., Tong, Lu (Carol), Chen, J., Tang, J., & Zhou, X. (2017). Joint optimization of high-speed train timetables and speed profiles: A unified modeling approach using space-time-speed grid networks. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 97, 157-181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.002> (in English)
17. Klimenko, I., Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2018). *Parameter Optimization of the Locomotive Running Gear, Transport Means 2018: Proceedings of 22nd International Scientific Conference*. Trakai, Klaipėda. (in English)
18. Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., & Kroon, L. G. (2017). Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355-376. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044> (in English)
19. Skiena, S. S. (2008). *The Algorithm Design Manual*. London: Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-070-4> (in English)
20. Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X., & Zhou, P. (2016). The key principles of optimal train control. Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 94, 482-508. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.023> (in English)
21. Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X. & Zhou P. (2016). The key principles of optimal train control. Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 94, 509-538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.024> (in English)
22. Wang, P. (2017). *Train Trajectory Optimization Methods for Energy-Efficient Railway Operations*. (Doctoral thesis). Delft University of Technology, Delft. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ace04a07d-89fc-470a-9d1a-b6fae9182dae> (in English)
23. Warg, J., & Bohlin, M. (2016). The use of railway simulation as an input to economic assessment of timetables. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(3), 255-270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.08.001> (in English)
24. Ye, H., & Liu, R. (2017). Nonlinear programming methods based on closed-form expressions for optimal train control. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 82, 102-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.011> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.01.2019

Прийнята до друку: 14.05.2019

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

UDC 625.143.46:678.5-026.569

A. NEMETH^{1*}, S. FISCHER²

^{1*}Dep. Transport Infrastructure and Water Resources Engineering, Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 544, e-mail nemeth.attila@sze.hu, ORCID 0000-0002-3477-6902

²Dep. Transport Infrastructure and Water Resources Engineering, Szechenyi Istvan University, Egyetem Sq., 1, Gyor, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 544, e-mail fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

LABORATORY TEST RESULTS OF GLUED INSULATED RAIL JOINTS ASSEMBLED WITH TRADITIONAL STEEL AND FIBRE-GLASS REINFORCED RESIN-BONDED FISHPLATES

Purpose. The authors' aim is to evaluate more precisely the deterioration process of glued insulated rail joints with polymer-composite and steel fishplates regarding to own laboratory tests. **Methodology.** The laboratory tests were executed by three-point static and three-point dynamic (fatigue) bending tests' measurement results related to glued insulated rail joints with fibre-glass reinforced polymer-composite fishplates (brand: APATECH). During the research the static three-point bending tests were performed on rail joints assembled with three different rail profiles (MÁV48, 54E1 (UIC54) and 60E1 (UIC60)) with three specimens, measured on 13 different support bay values before fatigue test, as well as after 3.5 million loading cycles (the degradations process was checked after every 0.5 million cycles) on polymer-composite and steel fishplated rail joints. **Findings.** The investigation of fiber-glass reinforced and steel fishplated rail joints (three-point static and dynamic bending laboratory tests) are in progress. Considering to them, the mechanical deterioration processes were able to be determined by measurements of deflection values compared to original ones (i.e. before fatigue tests). The differences can be pointed out by analysis of measurement results related to both types of glued insulated rail joints (steel and polymer-composite fishplated ones). **Originality.** The goal of this research is to investigate the application of this new type of glued insulated rail joint and to determine the ultimate lifetime of the investigated rail joints, e.g. how much time they can be safely held in the railway track without damage. In the international literature no one has investigated this field of glued insulated rail joints. **Practical value.** The fibre glass reinforced resin-bonded fishplated glued insulated rail joints and 'control' steel fishplated glued insulated rail joints were built into railway line (between Kelenföld and Hegyeshalom state border) in Hungary at three different locations. In this article the investigation of deterioration process of glued-insulated rail joints and steel fishplated glued insulated rail joints are demonstrated only by laboratory bending tests.

Keywords: laboratory tests; fibre glass; fishplate; railway joint; degradation

Purpose

In this paper the authors summarize the laboratory three-point bending tests results related to glued insulated rail joints with special fibre-glass resin-bonded (Russian branded, exact type: APATECH) reinforced plastic fishplates, as well as traditional steel fishplates. Regarding to fishplated glued insulated rail joints the most problems are the false railway control signs due to rail ends failures which resulting the railway capacity restriction. Other prob-

lems are for example the implementation of glue material, endposts, rail ends and wear of rail profile inner corner and plastic deformation.

In the international literature the researchers have been dealt with the following subtopics related to insulated or glued insulated rail joints:

- regulations related to design, mechanical dimensioning and formation [15, 26],
- specification of common failures and failure types of rail joints and identifying of the reason of failure [9, 10, 21, 23, 24, 25, 29, 36, 38, 39, 40, 45, 50, 54, 65, 69],

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- enhancement and improvement of rail joints (mechanical joints, insulated joints, as well as glued insulated joints) and components of these rail joints [2, 12, 19, 21, 22, 23, 25, 27, 29, 31, 36, 39, 45, 53, 54, 58, 69],
- evaluation of the significance of various materials of rail endpost on bearing capacity and stiffness of rail joints [2, 16, 21, 22, 23, 25],
- analysis of rail joints in structural and electrical ways [2, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 36, 37, 38, 45, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 65, 68, 69],
- investigation of elastic and plastic deformation (mainly vertical deflection) behavior of rail joints, as well as the stress-strain distribution in the rail head and fishplates; analysis of wheel-rail contact related to stress-strain distribution and wear process [2, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 18, 19, 23, 24, 27, 29, 32, 33, 36, 37, 45, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 68, 69],
- examination of the effect of the arc longitudinal form at railhead edges on the evolved stress values in the rail head [12, 57],
- analysis of support characteristics of rail joints, railway tracks and also ballast settlements [1, 34, 35, 36, 45, 64],
- examination of bonding material (between fishplates and rail webs) quality suitability [51, 52, 65, 66],
- investigation of the amount of used bonding material between due to assembly procedure, as well as the influence of the glue surface markings on bearing capacity of the whole rail joints [51, 52, 65, 66],
- analysis of glue material de-bonding symptom [52, 53, 65],
- investigation of the influence of the usage of square and inclined rail joints on the structural behavior of the rail joints [8, 11, 12, 13, 18, 36, 37, 58, 65],
- examination of the effect of the thickness of the endpost element [19, 21, 22, 25, 57, 58],
- analysis of lipping (and/or ratchetting) at rail ends next to endpost element [24, 25, 27],
- analysis of electric arc burning at insulated rail joints in high-speed railway stations [17],
- examination of dynamic effect due to under sleeper pads [34],
- development of special methodologies and

techniques for localizing and identification of faults (electrical and/or structural) in rail joints [2, 7, 13, 25, 40, 49, 55, 56, 59, 65],

– examination of dynamic effects due to rail joint failures and or defects [9, 10, 11, 23, 31, 32, 33, 40, 50, 51, 55, 60, 61, 64, 68, 69],

– taking into account of dynamic effects of railway vehicles on railway tracks as well as measurement of equivalent conicity [3, 4, 6],

– examination of calculation and assessment methods of railway track geometry measurement data executed by track geometry recording cars from the viewpoint of real chord values [5].

Foreign research teams used the methods as follows:

– finite element modelling, static and dynamic approximation [10, 12, 13, 16, 23, 24, 29, 36, 37, 45, 50, 53, 54, 68, 69],

– laboratory tests [2, 13, 21, 22, 24, 25, 27, 39, 52, 54, 56, 57, 65, 66],

– field tests [2, 9, 10, 11, 18, 23, 31, 33, 34, 38, 40, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 60],

– calculations based on mathematical and physical theories, i.e. MATLAB [17],

– mathematical computation of degradation and maintenance assumption [41, 42, 43, 44, 51],

– IoT techniques,

– electrical measuring methods [14, 28],

– signal processing for non-destructive testing of railway tracks [59],

– mathematical (statistical) regression analysis and artificial intelligence, as well as artificial neural networks [41, 42, 43, 44].

– The authors mention some relevant results related to laboratory tests from literature review:

– The results of literature [2] indicated that dynamic stresses in bonded insulated joints are able to be reduced nearly 40% in joint bars by a combination of design improvements on insulated joint components. Improved fishplate material properties are expected to lead to considerably reduced risk of bar fatigue failures in track. With improved insulated rail joints the bending stress in the fishplate at its critical middle section was able to be reduced by around 22%. The authors of article [2] published that the usage of forged alloy steel fishplates reduce the risk of fishplate failures especially under fatigue loading. Ceramic end post material as a structural element of a glued insulated rail

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

joints lower dynamic compressive fishplate stress by approx. 24% and tensile stress by approx. 17% based on laboratory testing. The completed laboratory tests to compare the improved insulated rail joint including all component level improvements against a standard (normal) insulated rail joint verified that the improved assembly has 15% less deflection, 49% less compressive and tensile stresses on the fishplates [2].

– In paper [13] the edge effect to the wheel/rail rolling contact problem was examined with laboratory tests and validated 3D finite element model that considers contact and material non-linear characteristics. A special test rig with a full-scale wheel was designed to be able to taking into account the rolling contact load on railhead. An image analysis methodology (so called Particle Image Velocimetry, PIV) was applied to specify the vertical, horizontal, as well as shear strains on the rail end face. Common strain gauge method was applied to validate the vertical strain received from the PIV method. A virgin railhead edge demonstrated a notable amount of plastic deformation in the first loading cycle compared to following loading cycles. More than twenty thousand microstrains ratchetting was measured for the hundred loading cycles with both the loaded (approx. 130.7 kN) and unloaded (approx. 50 kN) vehicle wheel loads. Deeper plastic zone was resulted on the rail end face related to the loaded than the unloaded vehicle wheel load. The experimental assembly and laboratory test setup are able to be applied to study the wheel/rail contact (interaction) problem with different rail test samples and loading conditions [13].

– An experimental investigation and improvement of insulated rail joints end post performance were executed in PhD thesis and two papers [21, 22]. The aim of this PhD thesis was to specify the resistance to sliding wear, impact wear, rolling/sliding contact wear, compression wear of five different end post materials with different characteristics against train steel wheel material, as well as the effect of tests parameters and lubrication on these tested materials. The end post materials were classified into thermoplastic materials and thermo-setting materials according to melting point temperature. The thesis resulted that the performance of the insulated rail joints can be improved with selection of the optimum end post material. The best choice is the epoxy glass material for end post el-

ement based on better resistance during ‘sliding’ tests, as well as better wear resistance with lower temperatures (i.e. without melting) [21, 22].

– Paper [24] introduced an experimental method that ensures measurement of the progressive ratchetting at rail end next to end post. A special test rig was designed for this research. The rig also provided the capability of testing of the wheel/rail rolling contact conditions. The authors measured and analysed the following parameters: e.g. vertical strain variation along depth of unsupported rail end, accumulation of plastic strain, as well as they had to validate their finite element model using laboratory test results. The article pointed out that the unsupported railhead edge within the gap of the insulated rail joint was found to accumulate momentous plastic strain during the passage of each wheel, with the rate of accumulation being the highest during the initial period of the wheel passage. The top corner of the railhead edge is the most vulnerable position [24].

– Experimental modelling of lipping in insulated rail joints and investigation of rail head material improvements were executed in article [25]. Lipping tests of different types of steel rail head over different types of endpost have been performed by rolling and sliding twin disc test machine. Lipping in these laboratory tests has been caused by both the bulk deformation of the steel at the endpost and influenced by the tractive force and ratchetting of the steel at the running surface. Higher steel grades and epoxy glass end post materials resulted the optimum solution (lower plastic deformation during the executed laboratory tests [25].

– Article [27] summarized the results of test series performed with full-scale sections of rail that had been treated by laser cladding (1–2 mm thick layer of high performance material) on the rail head. During laboratory tests wear, lipping of insulated block joints and bending fatigue of clad samples were measured. The wear rate of the clad samples was approx. 78–89% lower than that of the standard R260 (rail steel grade) reference sample. Cladding of either side of an insulated block joint significantly improved its lipping resistance and allows it to withstand c.a. 3 times the energy input into the contact compared to a standard unclad sample. A section of rail clad with martensitic stainless steel was tested with fatigue bending test with five million cycles at a stress range of

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

350 MPa (it passed to R260 steel grade). Bend tests were executed regarding to standard prescription of flash but welded rail in the UK [27].

– In paper [39] microstructural changes in the nearness of endposts of insulated rail joints made from both surface coated and uncoated rail were examined using methods of optical and scanning electron microscopy. Damaged insulated rail joints made from pearlitic head hardened rail steel materials were compared with head hardened rail steel laser coated with martensitic stainless steel materials, from those the last mentioned had an increased service life [39].

– Characterizing and inspecting for progressive epoxy debonding were introduced in article [51] related to glued insulated rail joints. Paper [51] deals with detailed manner with the debonding phenomena in the interface between fishplates and rail webs. Measurements showed that epoxy debonding tends to begin at the endpost element near the top edge, bottom edge, or both edges of the fishplate. Debonding can occur on all four rail-fishplate interfaces within a rail joint. The size of the debonded region did not vary considerably between the so called field side (outer side) and the so called gage side (inner side). However, there was a considerable trend for one end of the rail joint to have more debonding than the other end [51].

– Gallou et al. [53] different methods for external reinforcement of insulated rail joint, e.g. strap rails, beams. Usage of strap rails reduced the vertical deformation of a suspended insulated rail joint. This kind of improvement resulted higher deflection than the plain rail. However, the strap rails are recommended as a cost-effective external reinforcement for maintaining the insulated rail joints performance over time. Usage of 39% stiffer I-beam sections reduced the vertical deformation of a suspended insulated rail joint to a higher level than that obtained by strap rails. More robust beams can reduce the deflection of insulated rail joints to a level similar to that of plain rails. The effect of external reinforcement on the reduction of displacement and dip angle of an insulated rail joint is more critical for soft or softer support characteristics. The structural reinforcement reduced the total dip angle of a suspended insulated rail joints for all support circumstances by a considerable level. The total dip angle had not a linear correlation with the stiffness increase [53].

– Buggy et al. [55] dealt with laboratory and field (in-situ) strain measurement methodology using optical fibre Bragg grating sensors. The technique is adequate for measurement of e.g. insulated rail joints (fishplates) or switch blades. The sensors detect the signals during the passage of a tram/train over the sensor location. For the fishplates, a controlled series of investigations was undertaken in which the torque of the fishplate bolts was changed, both in a laboratory and in railway track. Both measurement methods showed and verified that it is possible to measure strain as an indicator of bolt-torque, and wavelet-based assessment of the time series facilitated the use of principal component analysis to classify the signals by bolt-torque. The usage of this technology would allow continuous monitoring of railway track components, offering significant safety and economic benefits over current practices [55].

– Article [56] demonstrates a laboratory test method for determination residual stresses in insulated rail joints with usage of neutron diffraction technique. Neutron diffraction analyses were carried out on the samples in longitudinal, transverse and vertical directions, and on 5 mm thick sliced samples cut by Electric Discharge Machining (EDM). Old (ex-service) rail samples, irrespective of loading conditions and service times, were found to have similar depth profiles of stress distribution [56].

– A reflection based ultrasonic approach was applied to condition monitor glued insulated rail joints through to failure, under the application of a dynamic shear load [65]. The technique monitored the glued interface, a key failure site in glued insulated rail joints, using a normally incident longitudinal ultrasound wave. Measured reflection coefficients showed that the failure of glued insulated rail joint started with the degradation of the glued insulating layer. The results showed that ultrasound can be used to monitor the condition glued insulated rail joints [65].

– Nicoli et al. [66] performed laboratory tests with a lot of types of glue materials of glued insulated rail joints. The authors mainly used common, standard adhesive material tests to characterize glued insulated rail joints' adequacy. The different tests were not intended to give a unique indication in terms of the combination of adhesive, insulator, and surface treatment that guarantee the best over-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

all performance for a real insulated rail joint. Nevertheless, it was observed that one of tested adhesive material had the best apparent shear strength measured with single lap joints, although it did not show the best performances in other tests [66].

The authors' aim is to compare the behavior of polymer-composite fishplated (fishplate type: APATECH, rail joint type so called MTH-AP), as well as control steel fishplated (type GTI and MTH-P) glued insulated rail joints in railway track and determine the exact deterioration process as a function of loading cycles (or elapsed time). The authors' future task is to investigate and perform diagnostic analysis of experimental (with fibre-glass reinforced fishplates) and control (with traditional steel fishplates) glued insulated rail joints from straightness tests and track geometry recording car measurements and determine the variation of state characteristics of these rail joints.

This article is the continuation of the authors previous papers [25, 45, 46, 47]

Methodology

In this chapter the history of authors' research related to laboratory tests is presented. These tests were executed with three pieces of specimens, one specimen for MÁV48 (48.3 kg/m and 48.5 kg/m), one for 54E1 (54.43 kg/m) and one for 60E1 (60.21 kg/m) rail profiles, which assembled by MÁV-THERMIT Ltd. in 2016.

Before starting the laboratory tests, the authors had to determine the laboratory test parameters. It should be mentioned, that there isn't currently valid European or national standard or technical specification for the polymer-composite fishplated glued insulated rail joints, therefore CEN/CENELEC: WG18/DG11 [15] standard was applied, which refers to the steel fishplated glued insulated rail joints' laboratory tests. The examined formation of glued insulated rail joints with APATECH branded fishplates in railway track are shown in Fig 1.



Fig. 1. Glued insulated rail joints with special fibre-glass reinforced plastic (polymer-composite) fishplates (brand: APATECH) in railway track (authors' photo)

During the first part (Research + Development between 2015-2017 years) of the three-point laboratory bending test series the considered parameters, characteristics, the process of testing were as below.

Static shear tests of glue materials

There were 2 periods of shear test series of glue materials: 54 pieces of glued specimens (c.a. 150-200 mm long rail, 300-400 mm long fishplates glued on both sides) were prepared and they were tested. The laboratory tests were executed with 8 different types of glue materials. Based on the calculated shear strength values the IBI and IAI

glue material were chosen for further laboratory tests [25, 45, 46, 47]. The reason that these types were chosen: glue material IBI is commonly applied at Österreichische Bundesbahnen (ÖBB, Austrian Railways) for glued insulated rail joints, glue material IAI had very high shear strength.

Bending tests

During the static three-point bending, fatigue (dynamic) and static bending breakage tests the authors defined the parameters, according to the standard [15], as well as Zimmermann-Eisenmann superstructure calculation method, the values of bending moments were calculated separately for

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

different rail profiles depending on the maximal loading force and the supporting interval. The computed values of bending moments are shown in Table 1 (specimens were assembled by MÁV-THERMIT Ltd.). The testing parameters were the followings:

- static three-point bending test without breakage, before fatigue (BF), on supporting bays: 1000, 1200 and 1490 mm,
- vertical load consists of two phases:
 - in the first phase: a pre-load is applied that the tested rail joint should lift (move) into the desired position,
 - in the second phase: a load is applied up to the calculated maximum value (hold this peak load for 2 minutes) and then release it to the unloaded (0) position,
- three-point dynamic bending fatigue test with 3.5 million loading cycles (bays: 1200 mm),
- static three-point bending tests without

breakage after fatigue (AF), bays: as mentioned before,

- static three-point bending test until breakage (failure), bay: 1490 mm,
- number of specimens: 9 (length of specimens: $2 \times 850 \text{ mm} = 1700 \text{ mm}$). 3×2 pieces of specimens for each rail profiles that prepared (assembled) by IAI type glue material, and 3 pieces with IBI type glue material,
- the MÁV-THERMIT Ltd. prepared more 3 specimens without glueing for control.

Meanwhile the three-point bending tests (before fatigue and after fatigue) the maximum vertical displacement in middle of the bay (thousandth mm precisely) depends on the maximum force, these parameters were measured and recorded.

Results of these laboratory tests were published in [25].

Table 1

Calculated values of bending moments

Rail profile	Support bay [mm]	Max vertical force [kN]	Bending moment [kNm]
60E1	1 490	114.44	42.63
	1 200	142.10	
	1 000	170.52	
	1 490	109.66	
54E1	1 200	136.17	40.85
	1 000	163.40	
	1 490	93.18	
MÁV 48	1 200	115.70	34.71
	1 000	138.84	

During the 2nd part of the research (additional tests that are supported by the ÚNKP-18-3 New National Excellence Program of the Ministry of Human Capacities) the authors executed more laboratory tests, namely additional (supplementary) three-point bending tests. The considered parameters, characteristics, the process of testing were the followings (Fig. 2.):

- static three-point bending test before fatigue (initial static test, without breakage),

- three-point dynamic fatigue test with 0.5-0.5 million loading cycles (altogether 7×0.5 million cycles, the applied support bay length was 1200 mm for every specimens),

- static three-point bending test with very precise vertical displacement (deflection) measurements after every 0.5 million loading cycles until the final 3.5 million loading cycles (remark: this measurement was performed certainly before the first dynamic tests, too),

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- vertical displacement measurement in 7 different points with symmetric support layout,
- on 13 different support bay values (900...1490 mm, on 50 mm latitude steps),
- from antecedent research: investigation of steel fishplated glued-insulated rail joints that were already bear fatigue tests with 3.1 million loading cycles – execution of additional three-point dynamic bending tests with 0.4 million cycles,
- after 3.5 million loading cycles additional measurements on symmetric support bays with all the rail joint specimens (with polymer-composite

and steel fishplated glued insulated rail joints, too, between 600 and 900 mm support bay values),

- after 3.5 million loading cycles additional measurements on asymmetric support bays with all the rail joint specimens (with polymer-composite and steel fishplated glued insulated rail joints, too, between 600 and 900 mm support bay values),
- vertical displacement measurements in 9 different points with symmetric support layout,
- the maximum vertical displacement values were measured at two locations (in the middle of the support bay length, and in the middle of the specimen).



Fig. 2. The 3-point bending test arrangement of the laboratory measurement

The authors give an example for the required time period related to laboratory tests: the value of dynamic bending moment according to 54 rail profile specimens on 1200 mm support bay: $F_{min}=5$ kN, $F_{max}=136.2$ kN, $f=5$ Hz sine signal ($M_{max}=40.85$ kNm) 0.5 million loading cycles required approx. 27.77 hours. Completion of fatigue test with 3.5 million loading cycles for one specimen is about 194.44 hours.

The goal was to evaluate the more accurate deterioration process of glued insulated fishplated rail joints.

Findings

In the followings additional results of three-point bending tests are introduced.

During the first part of the test-series [25, 45, 46, 47] (before fatigue and after fatigue) vertical displacement in the middle of the bay length as a function of vertical force value were measured

and recorded. After the test it was experienced that the vertical displacement values related to applied maximum vertical force values were higher for polymer-composite fishplated glued insulated rail joints than the limit value prescribed for steel fishplated rail joints in standard [15] but the tested specimens were passed the laboratory tests without any problems. So the fatigue tests were done without any crackings, failures and breakages, there was not any visual failure neither on the fishplates nor on the rail end posts.

Symmetric support bay layout

After the the second part of test series (i.e. the additional laboratory tests, supported by ÚNKP-18-3) the sentenced findings are the followings:

- The goal was to evaluate the deterioration process of polymer-composite fishplated glued insulated rail joints as well as steel fishplated glued

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

insulated rail joints by detailed and sophisticated laboratory tests.

- Calculated parameters that can be compared to the first (BF) measurement values (from 0.0 to 3.5 Mio. loading cycles).

- Investigation of the change of calculated parameters (ratio: how it has been changed from the first measured data (BF)).

- Analysis of the measured values depending on the applied force vs. vertical deflection (slope of the curves – linear fitted lines). The measured data were represented in graph related to the three rail profiles and loadings (before fatigue test (BF) until 3.5 million loading cycles on 900...1490 mm support bay lengths). Fig. 3 shows average vertical deflection values in the middle of the specimen related to MÁV 48 rail profile on 1000 mm support bay. The separated curve in graph on the right side is related to the non glued (WG, i.e. without glueing) specimen. This graph shows that how much higher deflection values occur if the any adhesive material isn't applied in insulated rail joints with fishplates. Fig. 3 demonstrates that

glued insulated rail joints with traditional steel fishplates had much smaller vertical deflections in the middle of the specimen than with special plastic fishplates. Fig 4. illustrates an example for deflection 'curve' for the whole length rail joint specimen.

- Linear regression functions can be fitted to the recorded data series (uploading section until e.g. 90 kN or peak force values), these can be applied to determine the variation of the tangent values (for different cases).

- Calculation of stiffness characteristic parameters which depends on the tangent of the linear regression functions (mentioned above) and the support bay length values (unit: kN/mm/mm). Fig. 5 shows the so far executed measurements and calculated stiffness characteristic values related to 48 rail profile specimens on all support bay lengths. The graph shows that the highest stiffness value is related to steel fishplated glued insulates rail joint specimens. Curiosity, behavior of all rail joints is quite similar.

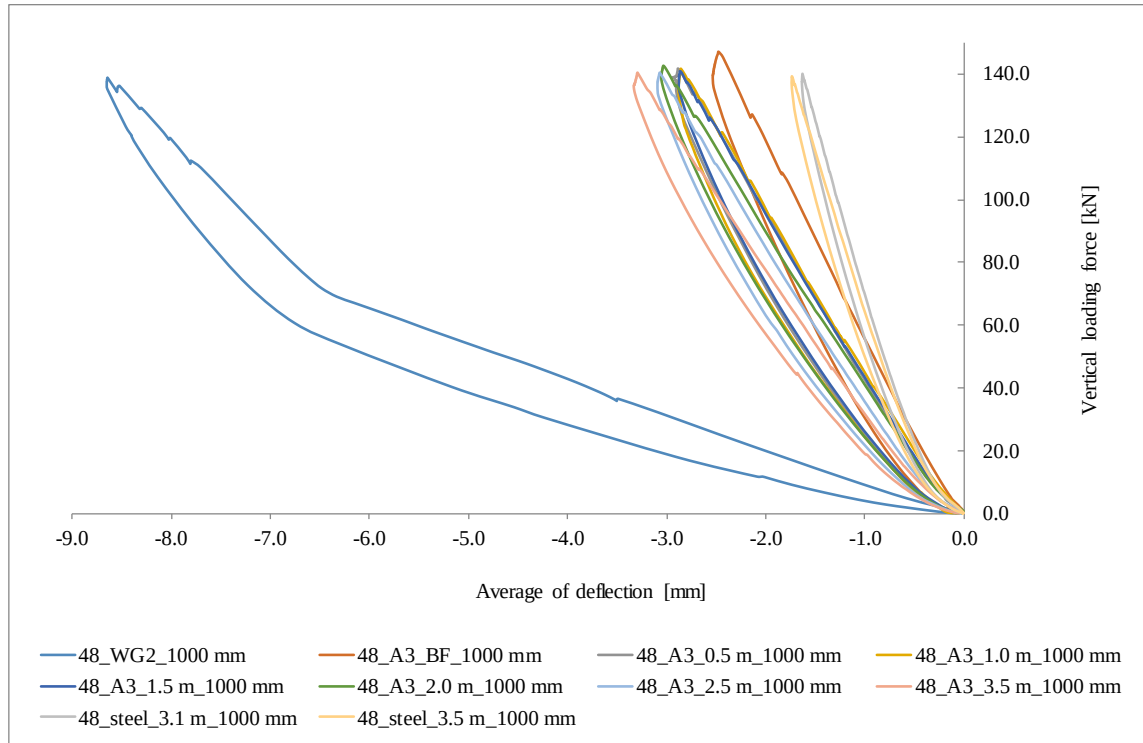


Fig. 3. Average deflection as a function of applied vertical force (48 rail profile, 1000 mm support bay length)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

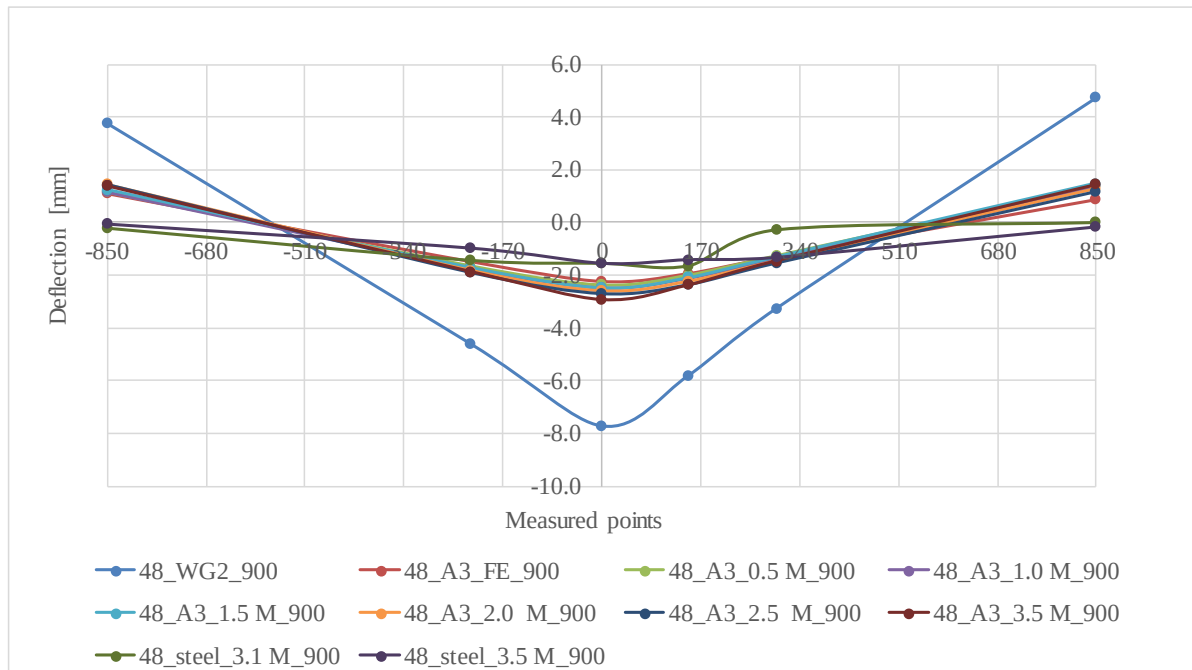


Fig. 4. Deflection 'curve' for the whole length rail joint specimen
(48 rail profile, 900 mm support bay length, symmetric layout)

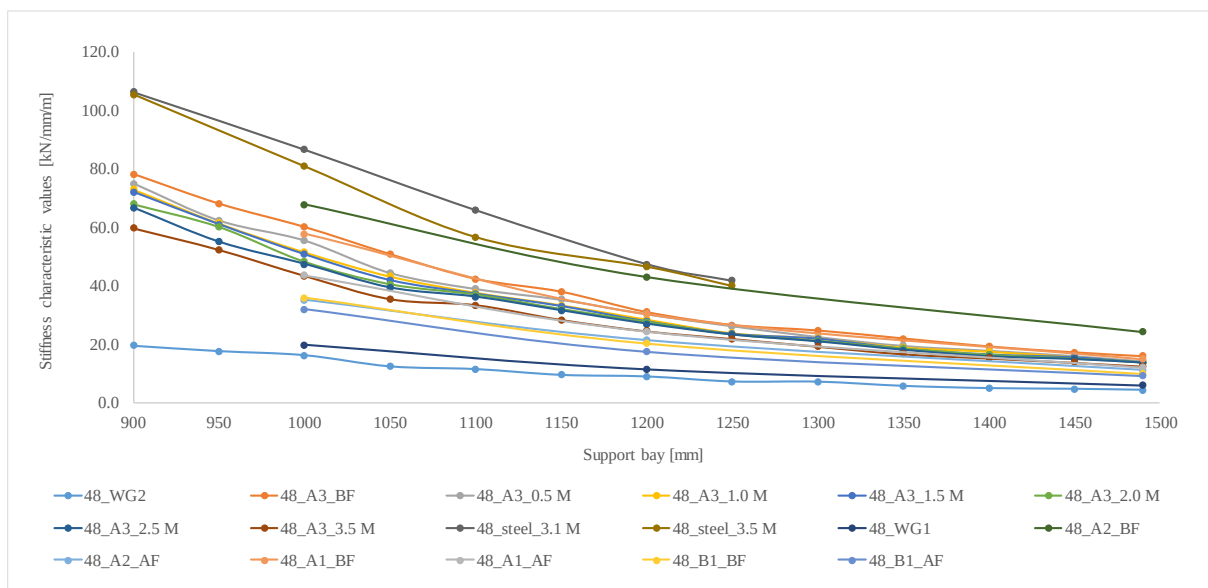


Fig. 5. The stiffness characteristic values as a function of support bay lengths (48 rail profile)

– Representation of values as a function of different support bay lengths, as well as fatigue loading cycles.

– Representation of ratio of stiffness characteristic values, which value depends on the first measured data (before fatigue).

– Depiction of measured vertical displacement values (in 9 different points along the specimens), illustration and calculation of the area below the graphs (i.e. integer, with trapezoid rule) – to be able to check the state change process of specimens according to fatigue loading cycles. The

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

area (integer) values were computed from the values below the ‘curve’ that is illustrated in Fig. 6 for every support bay length value related to specimen with 48 rail profile with applied maximum vertical force. Determination of the ratio

relative to the first measured data related to every support bay length, it seems there is linear correlation between this parameter and the support bay length values for all three rail profiles.

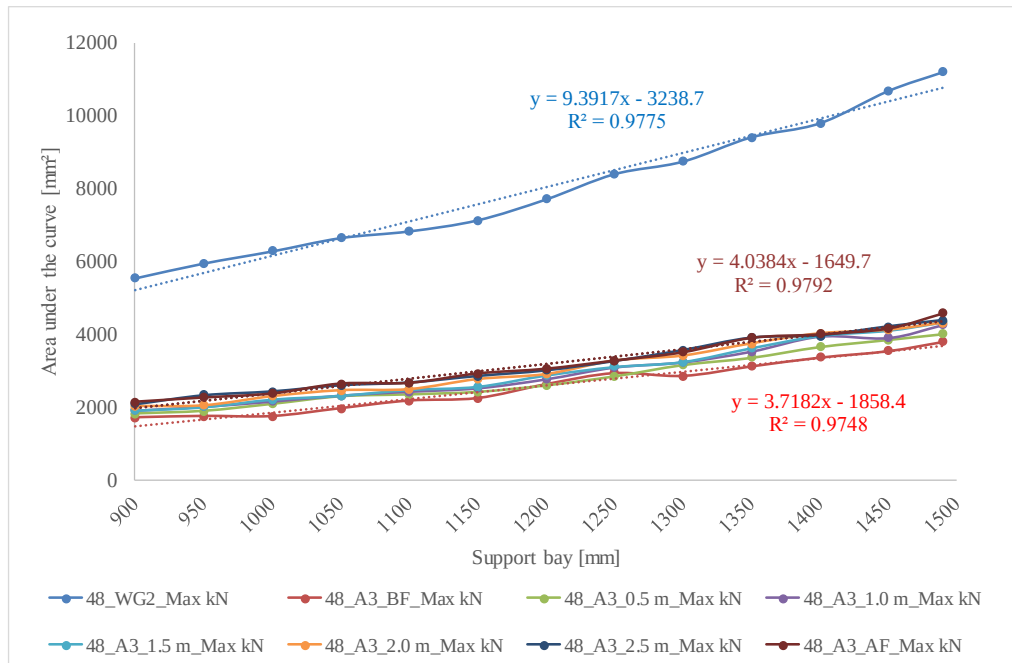


Fig. 6. The calculated area values under the curve as a function of support bay lengths (48 rail profile specimen)

Asymmetric support bay layout

After 3.5 million loading cycles bending tests were performed on asymmetric support bay layouts for all the rail joint specimens (polymer-composite and steel fishplated joints, too) between 600 and 900 mm. Measurements were executed similarly to the symmetric layout, however, this (asymmetric layout) was measured only after 3.5 million fatigue loading cycles. The values were calculated and compared relatively to the results from symmetric layout after 3.5 million loading cycles. Values were recorded for three different support layouts per support bay length values (e.g. on 600 mm support bay layout the arrangements from the middle of the specimen were the following: 150-450 mm, 200-400 mm and 250-350 mm).

Originality and practical value

The role of the glued insulated rail joints with fishplates is to ensure the continuity of rails without horizontal and vertical steps, avoiding the di-

rectional ‘refraction’ between rail ends. Rail joints are the weak points of the track, because their fishplates can compensate only the 60% of the moment of inertia of the rail. Wheels hits the following rail end during through-rolling the rail end gap, which is disadvantageous for the whole railway super- and substructure, too. Dynamic effects are much higher in case of vertical and/or horizontal steps.

Insulated rail joints can be applied in suspended and supported joints depending on their type in case of value of sleeper space and wheel load prescribed by manufacturer. High tensile strength bolts with great forces are used to ‘press’ fishplates and rail together. In this way high friction force can be achieved, it causes that the high tensile forces cannot open the rail joints. Plastic profile lining plate (end post) is built between rail ends. Insulated rail joints can be produced in plant as prefabricated elements with given length rails, as well as on the field, where they are assembled.

The usage of glued insulated rail joints with glass-fibre reinforced plastic fishplates is able to eliminate the electric fishplate circuit and early fa-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

tigue deflection and it can ensure the isolation of rails' ends from each other by aspect of electric conductivity.

After the first series of laboratory tests, rail joints for field tests were manufactured with usage of 'A' type glue material. The polymer-composite fishplated glued insulated rail joints and the assigned control glued insulated rail joints (for comparison) were built-in the track in four different locations, with three different rail profiles, for three different speed categories (Biatorbágy, Tatabánya, Győr, Lébény-Mosonszentmiklós railway stations, every is in the MÁV No. 1 main railway line, Kelenföld-Hegyeshalom state border). According to railway maintenance experiences of Hungarian Railways (MÁV) and Raaberbahn, Győr-Sopron-Ebenfurth Railway (ROeEE, in Hungarian: GYSEV), glued insulated steel fishplated rail joints need a lot of maintenance source (money and work) due to rail deformations (settlements). Usage of plastic fishplated glued insulated rail joints can be solution to the problems of keeping the construction specifications in place during installation into railway track.

Conclusions

The authors represented the results of additional laboratory tests on glued insulated rail joints with traditional steel fishplates, as well as fibre-glass reinforced plastic fishplates. The aim of this research was to determine the ultimate lifetime of the investigated glued insulated rail joints by laboratory three-point static and dynamic bending tests.

The authors sentenced the following important facts derived from this part of their research.

The authors tried to investigate and analyse the conformity of the glued-insulated rail joints with glass-fibre reinforced plastic fishplates (brand of fishplates: APATECH) according to laboratory and field tests. Glue material type "AI was chosen for the detailed laboratory tests series, as well as for field tests. This type of adhesive material had very high shear strength during laboratory tests, and it ensured good initial results from bending tests, as well as axial pulling tests.

The main goal should be to compare the behaviour of different types of glued insulated rail joints (i.e. traditional steel fishplated one, as well as plastic fishplated one). The traditional steel fishplated

glued insulated rail joints are commonly applied at most Railways/Railway Companies, but there are some problems with them, e.g. the so called short circuit due to rail ends' plastic deformation (e.g. ratchetting, etc.), or failure of end posts, or electric insulation problem between fishplates and rails, breakage, etc. Glass-fibre reinforced fishplates are produced of electric insulation material, so no further insulation layer is needed. It should be mentioned that the expected deformation of glued insulated rail joints with this kind of plastic fishplates are resulted with higher deformation values (vertical deflections, settlements). This fact was verified by the authors' measurement results.

The test series of the authors consisted not only laboratory tests [25] but field tests (in real railway track [25, 45, 46, 47]).

The authors would like to define the accurate deterioration process of the investigated glued insulated rail joints as a function of loading cycles. They applied three different rail profiles, many support bay length values, as well as symmetric and asymmetric support bay layouts, too. The laboratory dynamic fatigue tests are useful because they can simulate loading of many years (e.g. the applied 3.5 million loading cycles means more than 5 years related to the Hungarian No. 1 main railway line, Kelenföld-Hegyeshalom state border), but it needs only 194.44 hours in the laboratory, as well as laboratory tests ensure (ideal) controlled and regulated test conditions.

The authors determined in [47] that the glued insulated rail joints with Apatech branded fishplates – on the basis of railway track measurements – are not a general solution for replacing the steel fishplated glued insulated rail joints in the CWR railway tracks. The authors think that not only static but dynamic railway track measurements of glued insulated rail joints as well as their assessment can be a very interested research direction in the future.

The authors applied ultimate 3.5 million loading cycles during their laboratory tests, but it has to be mentioned that the European standard for steel fishplated glued insulated rail joints requires only 3.0 million. It has to be mentioned that e.g. in Austria this requirement is stricter than the European standard, i.e. the number of prescribed minimum fatigue loading cycles is 5.0 million [67].

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

More parameters were calculated in this article from the results of three-point bending tests:

- stiffness characteristic value (unit: kN/mm/mm),
- area under the curve (mm²), so called integer.

These parameters and their change were defined as a function of loading cycles, support bay values for different rail profiles, as well as for steel and glass-fibre fishplated glued insulated rail joints.

The presentation of the measured results can be performed by their original values, as well as ratio to the measured value for the same support bay length and same rail profiles, glued specimen, before fatigue test state. Or in other case, it can be compared to the cases, without glueing. In this way very expressive graph can be prepared.

Summarizely, glueing ensure approx. 2.5 times differences in the calculated parameters (compared to ‘without glueing’ cases, of course), it means glueing reduces elastic deformation (for the same given loading) related to insulated rail joints with glass-fibre reinforced approx. 2.5 times.

It should be mentioned that the increasing loading cycles raise the evolved deformations compared to the initial stage (before fatigue), e.g. glued insulated rail joint with 48 rail profile resulted with approx. 80%, with 54 rail profile 70%, as well as with 60 rail profile 90% is the stiffness characteristic value after 3.5 million loading cycles.

In case the stiffness characteristic values after 3.5 million loading cycles are calculated for steel fishplates as well as plastic fishplates, the results are the following related to 900 and 1200 mm support bay length values correlated to glued insulated rail joint specimens with plastic fishplates, before fatigue test:

- 900 mm support bay length:
 - 48 rail profile:
 - steel fishplated joint: +35%,
 - plastic fishplated joint: –24%,
 - 54 rail profile:
 - steel fishplated joint: +64%,
 - plastic fishplated joint: –31%,
 - 60 rail profile:
 - steel fishplated joint: +2%,
 - plastic fishplated joint: –36%,
- 1200 mm support bay length:
 - 48 rail profile:

- steel fishplated joint: +50,6%,
- plastic fishplated joint: –21%,
- 54 rail profile:
 - steel fishplated joint: +59%,
 - plastic fishplated joint: –33%,
- 60 rail profile:
 - steel fishplated joint: +35%,
 - plastic fishplated joint: –9%,

It can be concluded that the laboratory tests ‘use’ simple two-supports mechanical structure model, but in reality the mechanical structure model is much more complicated, e.g. continuous beam with more supports that can elastically or plastically settle. This kind of model is e.g. Zimmermann or the enhanced Zimmermann-Eisenmann model. In case continuous beam with more rigid supports is considered, the maximum bending moment decreased with 24.5% (i.e. Winkler model, $M=0.1888 \times F \times L$, where ‘M’ is the bending moment in kNm unit, ‘F’ is the vertical force in kN unit, and ‘L’ is the support bay length in m unit; correlated to the $M=0.25 \times F \times L$ equation).

According to the measurement results it can be an opportunity to be able to calculate deflection values, stiffness characteristic values, or ‘area under the curve’ values for variant support bay length or variant loading cycles. It should be mentioned that these values are able to be only ‘prognosed’ values.

In case the stiffness characteristic value is considered (as a function of loading cycles), there can be determined two separate sections related to plastic fishplated glued insulated rail joints:

- 1st: 0...1.0 million loading cycles,
- 2nd: 1.0...3.5 million loading cycles.

In the 1st section the tangent of the linear regression function is much higher than in the 2nd section, where the ‘lines’ tend to be plain. The tangent values of the graphs (in case the stiffness characteristic value in kN/mm/m unit) for 48 and 54 rail profiles are approx. –0.07, for 60 rail profile is approx. –0.03. It results that glued insulated rail joints with fibre-glass reinforced plastic fishplates with 60 rail profiles are 2.33 times ‘stiffer’ than the other two ones – related to stiffness characteristic value, considering applied loading cycles.

In case Fig. 4 is considered, it can be stated that the glued insulated rail joints with fishplated results a so called ‘knuckle’ in the rail, because the deflection ‘curve’ has a ‘refraction point’ in the

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

line of vertical force, in this way the continuous beam structure model isn't the best solution for modelling and calculations.

The authors sentence that at this stage of the research (given stage of data processing of results) it can't finish with accurate result for the lifetime of the tested glued insulated rail joints. However, it can be seen that the failure won't be/isn't assumed in the next some 100.000 loading cycles, maybe nor in the next some million loading cycles.

Based on the field tests there were no structural and geometric problems, signal and interlocking interruptions during the three-year observation

period, or any other situation with inspected glued-insulated rail joints.

The authors would like to continue their research in the determined direction and publish the new results in papers.

Acknowledgements

Thank you for the help of MÁV-THERMIT Ltd. This research is supported BY the ÚNKP-18-3 New National Excellence Program of the Ministry of Human Capacities.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Курган, Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2015/38250>
2. Advances in Bonded Insulated Rail Joints to Improve Product Performance [Electronic resource] / K. Ciloglu, P. C. Frye, S. Almes, S. Shue // 2014 Joint Rail Conference (April 2–4, 2014, Colorado Springs, CO, USA). – Colorado Springs, 2014. – Available at: <http://clc.am/k6j0lg> – Title from the screen. – Accessed : 18.03.2019. doi: <http://doi.org/10.1115/jrc2014-3746>
3. Ágh, Cs. A new arrangement of accelerometers on track inspection car FMK-007 for evaluating derailment safety / Cs. Ágh // Track Maintenance Machines in Theory and Practice, SETRAS 2018 : Conference Paper (November 2018, Žilina, Slovakia). – Žilina, 2018. – P. 7–14.
4. Ágh, Cs. Egyenértékű kúposság mérése Magyarországon: Pálya és jármű kapcsolata – futási instabilitás / Cs. Ágh // Sínek világa. – 2012. – Vol. 54, No. 6. – P. 10–13.
5. Ágh, Cs. Vágánygeometriai irány- és fekszintibák valós nagyságának értékelése hőmérési eredmények alapján / Cs. Ágh // Közlekedéstudományi szemle. – 2018. – Vol. 68, No. 5. – P. 46–55.
6. Ágh, Cs. Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből / Cs. Ágh // Sínek világa. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 17–20.
7. Albakri, M. I. Modeling and experimental analysis of piezoelectric augmented systems for structural health and stress monitoring applications : Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics / M. I. Albakri ; The Virginia Polytechnic Institute. – Blacksburg, Virginia, 2016. – 235 p.
8. Analysis of tapered, adhesively bonded, insulated rail joints / R. H. Plaut, H. Lohse-Busch, A. Eckstein, S. Lambrecht, D. A. Dillard // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2007. – Vol. 221. – Iss. 2. – P. 195–204. doi: <http://doi.org/10.1243/0954409jrrt107>
9. Askarinejad, H. Assessing the Effects of Track Input to the Response of Insulated Rail Joints Using Field Experiments / H. Askarinejad, M. Dhanasekar, C. Cole // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2012. – Vol. 227. – Iss. 2. – P. 176–187. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409712458496>
10. Askarinejad, H. Minimising the Failure of Rail Joints Through Managing the Localised Condition of Track [Electronic resource] / H. Askarinejad, M. Dhanasekar // Railway Engineering. – Edinburgh, 2015. – Available at: <https://clck.ru/FNZKS> – Title from the screen. – Accessed : 18.03.2019.
11. Ataei, S. Dynamic Forces at Square and Inclined Rail Joints: Field Experiments [Electronic resource] / S. Ataei, S. Mohammadzadeh, A. Miri // Journal of Transportation Engineering. – 2016. – Vol. 142. – Iss. 9. – Available at: <http://clc.am/Jx0xKw> – Title from the screen. – Accessed : 18.03.2019. doi: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000866](http://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000866)
12. A three dimensional finite element analysis of insulated rail joints deterioration / H. M. El-sayed, M. Lotfy, H. N. El-din Zohny, H. S. Riad // Engineering Failure Analysis. – 2018. – Vol. 91. – P. 201–215. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.042>

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

13. Bandula-Heva, T. M. Experimental Investigation of Wheel/Rail Rolling Contact at Railhead Edge / T. M. Bandula-Heva, M. Dhanasekar, P. Boyd // *Experimental Mechanics*. – 2013. – Vol. 24. – Iss. 2. – P. 943–957. doi: <http://doi.org/10.1007/s11340-012-9701-6>
14. Bongiorno, J. Track insulation verification and measurement [Electronic resource] / J. Bongiorno, A. Mariscotti // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 180. – Available at: <http://clc.am/L4nsTg> – Title from the screen. – Accessed : 21.03.2019. doi: <http://doi.org/10.1051/mateconf/201818001008>
15. Mechanical requirements for joints in running rails: WG 18 / DG 11 [Electronic resource]. – 2010. – 32 p. – Available at: <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/QgrcJHsHlltHGdfHRzQFTtBmPxKvzlMKthg?projector=1&messagePartId=0.6> – Title from the screen. – Accessed : 22.03.2019.
16. Chen, Y. C. Contact stress variations near the insulated rail joints / Y. C. Chen, J. H. Kuang // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2002. – Vol. 216. – Iss. 4. – P. 265–273. doi: <http://doi.org/10.1243/095440902321029217>
17. Cheng, Y. Transient Analysis of Electric Arc Burning at Insulated Rail Joints in High-Speed Railway Stations Based on State-Space Modeling / Y. Cheng, Z. Liu, K. Huang // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2017. – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 750–761. doi: <http://doi.org/10.1109/tte.2017.2713100>
18. Dhanasekar, M. Performance of square and inclined insulated rail joints based on field strain measurements / M. Dhanasekar, W. Bayissa // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2011. – Vol. 226. – Iss. 2. – P. 140–154. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409711415898>
19. Dhanasekar, M. Research Outcomes for Improved Management of Insulated Rail Joints / M. Dhanasekar // *Railway Engineering*. – Edingburgh, United Kingdom, 2015. – P. 1–14.
20. El-khateeb, L. Defect-based Condition Assessment Model of Railway Infrastructure : A Thesis in the Department of Building, Civil and Environmental Engineering / Laith El-khateeb ; Concordia University. – Montreal, Quebec, Canada, 2017. – 139 p.
21. Elshukri, F. A. An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints (IRJs) and Post Performance : A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy / Fathi A. Elshukri ; The University of Sheffield. – Sheffield, 2016. – 206 p.
22. Elshukri, F. A. An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints / F. A. Elshukri, R. Lewis // *Tribology in Industry*. – 2016. – Vol. 38, No. 1. – P. 121–126.
23. Experimental Investigation Into the Condition of Insulated Rail Joints by Impact Excitation / M. Oregui, M. Molodova, A. Núñez, R. Dollevoet, Z. Li // *Experimental Mechanics*. – 2015. – Vol. 55. – Iss. 9. – P. 1597–1612. doi: <http://doi.org/10.1007/s11340-015-0048-7>
24. Experimental modelling of lipping in insulated rail joints and investigation of rail head material improvements / P. Beaty, B. Temple, M. B. Marshall, R. Lewis // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2016. – Vol. 230. – Iss. 4. – P. 1375–1387. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409715600740>
25. Fischer, Sz. Investigation of polymer-composite fishplated glued insulated rail joints in laboratory, as well as in field tests for dynamic effects : Research Report / Sz. Fischer, A. Németh. – Győr : Universitas-Győr Non-profit Ltd., 2017. – 578 p.
26. Full-scale testing of laser clad railway track; Case study – Testing for wear, bend fatigue and insulated block joint lipping integrity / S. R. Lewis, R. Lewis, P. S. Goodwin, S. Fretwell-Smith, D. I. Fletcher, K. Murray, J. Jaiswal // *Wear*. – 2017. – Vol. 376–377. – P. 1930–1937. doi: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.023>
27. Health monitoring on line of the impedance of the glued isolating joints to improve the availability of the French railway lines [Electronic resource] / J. de Reffye, M. Antoni // *20e Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement (Saint-Malo 11–13 Octobre 2016)*. – Saint-Malo, 2016. – Available at: <https://clck.ru/FLzVH> – Title from the screen. – Accessed : 13.03.2019.
28. Himebaugh, A. K. Finite element analysis of bonded insulated rail joints / A. K. Himebaugh, R. H. Plaut, D. A. Dillard // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2008. – Vol. 28. – Iss. 3. – P. 142–150. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2007.09.003>
29. Horvát, F. Application of polymer-composite fishplates for glued insulated rail joints: Research Report / F. Horvát. – Győr : Széchenyi István Egyetem, 2012. – 62 p.
30. Impact Load Response of PC Rail Joint Sleeper under a Passing Train [Electronic resource] / K. Goto, S. Minoura, T. Watanabe, C. Ngamkhanong, S. Kaewunruen // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1106. – Available at: <https://clck.ru/FPHtF> – Title from the screen. – Accessed : 18.03.2019. doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1106/1/012008>

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

31. Kabo, E. Prediction of dynamic train-track interaction and subsequent material de-terioration in the presence of insulated rail joints / E. Kabo, J. C. O. Nielsen, A. Ekberg // *Vehicle System Dynamics*. – 2006. – Vol. 44. – Iss. sup1. – P. 718–729. doi: <http://doi.org/10.1080/00423110600885715>
32. Kaewunruen, S. Railway track inspection and maintenance priorities due to dynamic coupling effects of dipped rails and differential track settlements [Electronic resource] / S. Kaewunruen, C. Chiengson // *Engineering Failure Analysis*. – 2018. – Vol. 93. – P. 157–171. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.07.009>
33. Kaewunruen, S. Vibration attenuation at rail joints through under sleeper pads / S. Kaewunruen, A. Aikawa, A. M. Remennikov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 189. – P. 193–198. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.031>
34. Kurhan, D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State / D. Kurhan // *Acta Technica Jaurinensis*. – 2016. – Vol. 9, No. 1. – P. 83–96. doi: <http://doi.org/10.14513/actatechjaur.v9.n1.400>
35. Mandal, N. K. An Engineering Analysis of Insulated Rail Joints: A General Perspective / N. K. Mandal, B. Peach // *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2 (8). – P. 3964–3988.
36. Mandal, N. K. Stress Analysis of Joint Bars of Insulated Rail Joints Due to Wheel/Rail Contact Loadings / N. K. Mandal // *The 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, CM2018 (Delft, the Netherlands, September 24–27, 2018)*. – Delft, 2018. – P. 675–680.
37. Mayers, A. The effect of heavy haul train speed on insulated rail joint bar strains / A. Mayers // *Australian Journal of Structural Engineering*. – 2017. – Vol. 18. – Iss. 3. – P. 148–159. doi: <http://doi.org/10.1080/13287982.2017.1363977>
38. Microstructural Characterisation of Railhead Damage in Insulated Rail Joints / C. Rathod, D. Wexler, T. Chandra, H. Li // *Materials Science Forum*. – 2012. – Vol. 706-709. – P. 2937–2942. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.706-709.2937>
39. Monitoring bolt tightness of rail joints using axle box acceleration measurements / M. Oregui, S. Li, A. Núñez, Z. Li, R. Carroll, R. Dollevoet // *Structural Control and Health Monitoring*. – 2017. – Vol. 24. – Iss. 2. – Available at: <http://clc.am/gFvDkg> – Title from the screen. – Accessed : 18.03.2019. doi: <http://doi.org/10.1002/stc.1848>
40. Nagy, R. Analytical differences between seven prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods / R. Nagy // *Intersections*. – 2017. – Vol. 14, No. 1. – P. 14–32.
41. Nagy, R. Analytical differences between six prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods / R. Nagy // *Computational Civil Engineering 2017 : International Symposium (Iasi, Romania, May 26, 2017)*. – Iasi, 2017. – P. 31–50.
42. Nagy, R. A vasúti pályageometria romlási folyamatának leírása / R. Nagy // *Sínek világa*. – 2016. – Vol. 58, No. 6. – P. 12–18.
43. Nagy, R. Description of rail track geometry deterioration process in Hungarian rail lines No. 1 and No. 140 / R. Nagy // *Pollack Periodica*. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 3. – P. 141–156. doi: <http://doi.org/10.1556/606.2017.12.3.13>
44. Nannan, Z. Sleeper embedded insulated rail joints for minimising the number of modes of failure / N. Zong, M. Dhanasekar // *Engineering Failure Analysis*. – 2017. – Vol. 76. – P. 27–43. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.02.001>
45. Németh, A. A polimer-kompozit hevederes ragasztott-szigetelt sínkötések (2. rész): Vasúti pályás vizsgálatok / A. Németh, Sz. Fischer // *Sínek világa*. – 2018. – No. 60. – P. 12–17.
46. Németh, A. Field tests of glued insulated rail joints with polymer-composite and steel fishplates / A. Németh, Sz. Fischer // *Technika és technológia a fenntartható közlekedés szolgálatában: Közlekedéstudományi Konferencia* / B. Horváth, G. Horváth, B. Gábor (szerk.). – Győr, Magyarország : Universitas-Győr Nonprofit Kft., 2018. – P. 97–105.
47. Németh, A. Field tests of glued insulated rail joints with usage of special plastic and steel fishplates / A. Németh, Sz. Fischer // *Наука та прогрес транспорту*. – 2019. – № 2 (80). – С. 60–76. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/165874>
48. Nichoga, V. Defect Signal Detection Within Rail Junction of Railway Tracks / V. Nichoga, I. Storozh, O. Saldan // *Problemy Kolejnictwa*. – 2016. – Zesz. 171. – P. 57–62.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

49. Numerical study of wheel-rail impact contact solutions at an insulated rail joint / Z. Yang, A. Boogaard, Z. Wei, J. Liu, R. Dollevoet, Z. Li // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2018. – Vol. 138-139. – P. 310–322. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.02.025>
50. Nunez, A. Pareto-Based Maintenance Decisions for Regional Railways with Uncertain Weld Conditions Using the Hilbert Spectrum of Axle Box Acceleration / A. Nunez, A. Jamshidi, H. Wang // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15. – Iss. 3. – P. 1496–1507. doi: <http://doi.org/10.1109/tii.2018.2847736>
51. Peltier, D. C. Characterizing and Inspecting for Progressive Epoxy Debonding in Bonded Insulated Rail Joints / D. C. Peltier, C. P. L. Barkan // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2009. – Vol. 2117. – Iss. 1. – P. 85–92. doi: <http://doi.org/10.3141/2117-11>
52. Peltier, D. C. Modeling the Effects of Epoxy Debonding on Bonded Insulated Rail Joints Subjected to Longitudinal Loads [Electronic resource] / D. C. Peltier, C. P. L. Barkan // *87th Annual Meeting : Conference Recordings, 2008 TRB (January 13–17, 2008, Washington, D. C.)*. – Washington, 2008. – Available at: <http://clc.am/Q1cqpA> – Title from the screen. – Accessed : 13.03.2019.
53. Potential for external reinforcement of insulated rail joints / M. Gallou, B. Temple, C. Hardwick, M. Frost, A. El-Hamawli // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2016. – Vol. 232. – Iss. 3. – P. 697–708. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409716684278>
54. Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors [Electronic resource] / S. J. Buggy, S. W. James, S. Staines, R. Carroll, P. Kitson, D. Farrington, L. Drewett, J. Jaiswal, R. P. Tatam // *Measurement Science and Technology*. – 2016. – Vol. 27. – Iss. 5. – Available at: <http://clc.am/OfQAnA> – Title from the screen. – Accessed : 18.03.2019. doi: <http://doi.org/10.1088/0957-0233/27/5/055201>
55. Residual Stresses in Rail-Ends from the in-Service Insulated Rail Joints Using Neutron Diffraction / V. Luzin, C. Rathod, D. Wexler, P. Boyd, M. Dhanasekar // *Materials Science Forum*. – 2013. – Vol. 768-769. – P. 741–746. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.741>
56. Sandström, J. Numerical study of the mechanical deterioration of insulated rail joints / J. Sandström, A. Ekberg // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2009. – Vol. 223. – Iss. 3. – P. 265–273. doi: <http://doi.org/10.1243/09544097jrrt243>
57. Service Condition of Railroad Corridors around the Insulated Rail Joints / N. Zong, H. Askarnejad, T. B. Heva, M. Dhanasekar // *Journal of Transportation Engineering*. – 2013. – Vol. 139. – Iss. 6. – P. 643–650. doi: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000541](http://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000541)
58. Signal Processing for Non-Destructive Testing of Railway Tracks [Electronic resource] / T. Heckel, R. Casperson, S. Rühle, G. Mook // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 1949. – Iss. 1. – Available at: <http://clc.am/jOUayQ> – Title from the screen. – Accessed : 18.03.2019. doi: <http://doi.org/10.1063/1.5031528>
59. Soylemez, E. Influence of Track Variables and Product Design on Insulated Rail Joints / E. Soylemez, K. Ciloglu // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2016. – Vol. 2545. – Iss. 1. – P. 1–10. doi: <http://doi.org/10.3141/2545-01>
60. Sueki, T. Evaluation of Acoustic and Vibratory Characteristics of Impact Noise Due to Rail Joints / T. Sueki, T. Kitagawa, T. Kawaguchi // *Quarterly Report of RTR*. – 2017. – Vol. 58. – Iss. 2. – P. 119–125. doi: http://doi.org/10.2219/rtriqr.58.2_119
61. Sysyn, M. P. Performance study of the inertial monitoring method for railway turnouts / M. P. Sysyn, V. V. Kovalchuk, D. Jiang // *International Journal of Rail Transportation*. – 2018. – Vol. 4. – P. 33–42. doi: <http://doi.org/10.1080/23248378.2018.1514282>
62. Szamos, A. Structures and materials of railway superstructure / A. Szamos. – Budapest : Közdok, 1991. – 459 p.
63. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works / M. Sysyn, U. Gerber, V. Kovalchuk, O. Nabochenko // *Archives of Transport*. – 2018. – Vol. 46. – Iss. 3. – P. 91–107. doi: <http://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6512>
64. Theoretical study into efficiency of the improved longitudinal profile of frogs at railroad switches / V. Kovalchuk, M. Sysyn, J. Sobolevska, O. Nabochenko, B. Parneta, A. Pentsak // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 4, No. 1. – P. 27–36. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139502>
65. Ultrasonic Monitoring of Insulated Block Joints / J. Stephen, C. Hardwick, P. Beaty, R. Lewis, M. Marshall // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2018. – Vol. 233. – Iss. 3. – P. 251–261.
66. Using standard adhesion tests to characterize performance of material system options for insulated rail joints / E. Nicoli, D. A. Dillard, J. G. Dillard, J. Campbell, D. D. Davis, M. Akhtar // *Proceedings of the Institution of*

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2011. – Vol. 225. – Iss. 5. – P. 509–522. doi: <http://doi.org/10.1177/2041301710392481>
67. Wöhhart, A. ÖBB Infrastruktur AG: ÖBB Infrastruktur szigetelt kötés leírás. Nagyszilárdságú csavarkötéssel készült szigetelt sínillesztések [Electronic resource] / A. Wöhhart – 2011. – 88 p. – Available at: <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/QgrcJHsHlltHGdfHRzQFTtBmPxKvlzMKthg?projector=1&messagePartId=0.1> – Title from the screen. – Accessed : 22.03.2019.
 68. Yang, Z. Numerical modeling of dynamic frictional rolling contact with an explicit finite element method / Z. Yang, X. Deng, Z. Li // Tribology International. – 2019. – Vol. 129. – P. 214–231. doi: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.028>
 69. Zong, N. Structural and Material Characterisation of Insulated Rail Joints / N. Zong, D. Wexler, M. Dhana-sekar // Electronic Journal of Structural Engineering. – 2013. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 75–87.

A. НЕМЕС^{1*}, С. ФИШЕР²

^{1*}Каф. Инфраструктура транспорта и гидротехника, Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Угорщина, 9026, тел. +36 (96) 613 544, ел. пошта nemeth.attila@sze.hu, ORCID 0000-0002-3477-6902

^{2*}Каф. Инфраструктура транспорта и гидротехника, Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Угорщина, 9026, тел. +36 (96) 613 544, ел. пошта fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ КЛЕЙОВИХ ІЗОСТИКІВ ІЗ ТРАДИЦІЙНИМИ СТАЛЕВИМИ Й ПОСИЛЕНИМИ СКЛОПЛАСТИКОВИМИ НАКЛАДКАМИ

Мета. Автори передбачають більш точно оцінити процес зносу клейових ізолюваних рейкових з'єднань із полімерно-композитними і сталевими накладками за допомогою лабораторних випробувань. **Методика.** Лабораторні випробування проводилися за допомогою результатів вимірювань статичних і динамічних (втомних) випробувань на триточковий згин клейових ізолюваних рейкових стиків, посиленних склопластиковими полімер-композитними накладками (марка АРАТЕСН). У ході дослідження були проведені статичні випробування на триточковий згин рейкових стиків зі сталевими й полімер-композитними накладками. Для випробувань використані зразки трьох різних профілів (MÁV48, 54E1 (UIC54) та 60E1 (UIC60) після 3,5 млн циклів навантаження (процес зносу перевірено після кожних 0,5 млн циклів). Перед проведенням випробувань на втому зразки було виміряно на 13 різних значень. **Результати.** У наш час проводять дослідження посиленних склопластикових і сталевих рейкових з'єднань (треточкові статичні й динамічні випробування на вигин). Із урахуванням цих досліджень процеси механічного руйнування було визначено шляхом порівняння значень вигину з вихідними значеннями (тобто до випробувань на втому). За допомогою аналізу результатів вимірювань отримані відмінності щодо обох типів клейових ізолюваних рейкових з'єднань зі сталевими й полімер-композитними накладками. **Наукова новизна.** У результаті дослідження вивчено застосування нового типу клейових ізолюваних рейкових стиків і визначено остаточний термін служби цих рейкових з'єднань, зокрема, скільки часу їх можна безпечно використовувати на залізничній колії без пошкоджень. У міжнародній літературі ця сфера клейових рейкових стиків не була досліджена. **Практична значимість.** Рейкові стики, посилені склопластиковими накладками, а також Іконтрольні ізолювані клейові рейкові стики зі сталевими накладками були вбудовані в залізничну лінію між державним кордоном Келенфільд і Хед'ешалом в Угорщині в трьох різних місцях. У цій статті процес зносу клейових ізолюваних рейкових стиків продемонстровано тільки за допомогою лабораторних випробувань на вигин.

Ключові слова: лабораторні випробування; склопластик; накладка; рейковий стик; руйнування

A. НЕМЕС^{1*}, С. ФИШЕР²

^{1*}Каф. Инфраструктура транспорта и гидротехника, Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. +36 (96) 613 544, эл. почта nemeth.attila@sze.hu, ORCID 0000-0002-3477-6902

^{2*}Каф. Инфраструктура транспорта и гидротехника, Университет Иштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. +36 (96) 613 544, эл. почта fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ КЛЕЕВЫХ ИЗОСТЫКОВ С ТРАДИЦИОННЫМИ СТАЛЬНЫМИ И УСИЛЕННЫМИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫМИ НАКЛАДКАМИ

Цель. Авторы предполагают более точно оценить процесс износа клеевых изолированных рельсовых соединений с полимерно-композитными и стальными накладками с помощью лабораторных испытаний. **Методика.** Лабораторные испытания проводились с помощью результатов измерений статических и динамических (усталостных) испытаний на трехточечный изгиб клеевых изолированных рельсовых стыков, усиленных стеклопластиковыми полимер-композитными накладками (марка АРАТЕСН). В ходе исследования были проведены статические испытания на трехточечный изгиб рельсовых стыков со стальными и полимер-композитными накладками. Для испытаний использованы образцы трех различных профилей (MÁV48, 54E1 (UIC54) и 60E1 (UIC60) после 3,5 млн циклов нагрузки (процесс износа проверялся после каждых 0,5 млн циклов). Перед проведением усталостных испытаний образцы были измерены на 13 различных значений. **Результаты.** В настоящее время ведутся работы по исследованию усиленных стеклопластиковых и стальных рельсовых соединений (трехточечные статические и динамические испытания на изгиб). С учетом данных исследований процессы механического разрушения были определены путем сравнения значений изгиба с исходными значениями (то есть до испытаний на усталость). С помощью анализа результатов измерений получены отличия по типам клеевых изолированных рельсовых соединений со стальными и полимер-композитными накладками. **Научная новизна.** По результатам исследования изучено применение нового типа клеевых изолированных рельсовых стыков и определен окончательный срок службы данных рельсовых соединений, в частности, сколько времени их можно безопасно использовать на железнодорожном пути без повреждений. В международной литературе эта область клеевых рельсовых стыков не была исследована. **Практическая значимость.** Рельсовые стыки, усиленные стеклопластиковыми накладками, склеенными смолой, а также контрольные изолированные клеевые рельсовые стыки со стальными накладками были встроены в железнодорожную линию между государственной границей Келенфёльд и Хедьешалом в Венгрии в трех разных местах. В данной статье процесс износа клеевых изолированных рельсовых стыков продемонстрирован только с помощью лабораторных испытаний на изгиб.

Ключевые слова: лабораторные испытания; стеклопластик; накладка; рельсовый стык; разрушение

REFERENCES

1. Kurhan, D. M. (2015). To the solution of problems about the railways calculation for strength taking into account unequal elasticity of the subrail base. *Science and Transport Progress*, 1(55), 90-99. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2015/38250> (in Ukrainian)
2. Ciloglu, K., Frye, P. C., Almes, S., & Shue, S. (2014). *Advances in Bonded Insulated Rail Joints to Improve Product Performance, 2014 Joint Rail Conference*. Colorado Springs. Retrieved from <http://clc.am/k6j0lg> doi: <http://doi.org/10.1115/jrc2014-3746> (in English)
3. Ágh, Cs. (2018). A new arrangement of accelerometers on track inspection car FMK-007 for evaluating derailment safety, *Track Maintenance Machines in Theory and Practice, SETRAS 2018*. Žilina. (in English)
4. Ágh, Cs. (2012). Egyenértékű küpesség mérése Magyarországon: Pálya és jármű kapcsolata – futási instabilitás. *Sínek világa*, 54(6), 10-13. (in Hungarian)
5. Ágh, Cs. (2018). Vágánygeometriai irány – és fekszinthibák valós nagyságának értékelése húrmérési eredmények alapján. *Közlekedéstudományi szemle*, 68(5), 46-55. (in Hungarian)
6. Ágh, Cs. (2017). Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből. *Sínek világa*, 59(6), 17-20. (in Hungarian)
7. Albakri, M. I. (2016). *Modeling and experimental analysis of piezoelectric augmented systems for structural health and stress monitoring applications*. (Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics). The Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg. (in English)
8. Plaut, R. H., Lohse-Busch, H., Eckstein, A., Lambrecht, S., & Dillard, D. A. (2007). Analysis of tapered, adhesively bonded, insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(2), 195-204. doi: <http://doi.org/10.1243/0954409jrrt107> (in English)
9. Askarinejad, H., Dhanasekar, M., & Cole, C. (2012). Assessing the Effects of Track Input to the Response of Insulated Rail Joints Using Field Experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part*

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(2), 176-187. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409712458496> (in English)
10. Askarinejad, H., & Dhanasekar, M. (2015). *Minimising the Failure of Rail Joints through Managing the Localised Condition of Track*. *Railway Engineering 2015*. Edinburgh. Retrieved from <https://clck.ru/FNZKS> (in English)
 11. Ataei, S., Mohammadzadeh, S., & Miri, A. (2016). Dynamic Forces at Square and Inclined Rail Joints: Field Experiments. *Journal of Transportation Engineering*, 142(9). Retrieved from <http://clc.am/Jx0xKw> doi: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000866](http://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000866) (in English)
 12. El-sayed, H. M., Lotfy, M., El-din Zohny, H. N., & Riad, H. S. (2018). A three dimensional finite element analysis of insulated rail joints deterioration. *Engineering Failure Analysis*, 91, 201-215. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.042> (in English)
 13. Bandula-Heva, T. M., Dhanasekar, M., & Boyd, P. (2012). Experimental Investigation of Wheel/Rail Rolling Contact at Railhead Edge. *Experimental Mechanics*, 53(6), 943-957. doi: <http://doi.org/10.1007/s11340-012-9701-6> (in English)
 14. Bongiorno, J., & Mariscotti, A. (2018). Track insulation verification and measurement. *MATEC Web of Conferences*, 180. Retrieved from <http://clc.am/L4nsTg> doi: <http://doi.org/10.1051/mateconf/201818001008> (in English)
 15. *Mechanical requirements for joints in running rails: WG 18 / DG 11*. (2010). Retrieved from <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/QgrcJHsHlltHGdfHRzQFTtBmPxKvlzMKthg?projector=1&messagePartId=0.6> (in English)
 16. Chen, Y. C., & Kuang, J. H. (2002). Contact stress variations near the insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 216(4), 265-273. doi: <http://doi.org/10.1243/095440902321029217> (in English)
 17. Cheng, Y., Liu, Z., & Huang, K. (2017). Transient Analysis of Electric Arc Burning at Insulated Rail Joints in High-Speed Railway Stations Based on State-Space Modeling. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(3), 750-761. doi: <http://doi.org/10.1109/tte.2017.2713100> (in English)
 18. Dhanasekar, M., & Bayissa, W. (2011). Performance of square and inclined insulated rail joints based on field strain measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(2), 140-154. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409711415898> (in English)
 19. Dhanasekar, M. (2015). Research outcomes for improved management of insulated rail joints. In Forde, M. C. (Ed.), *Railway Engineering* (pp. 1-14). Edinburgh, United Kingdom. (in English)
 20. El-khateeb, L. (2017). *Defect-based Condition Assessment Model of Railway Infrastructure*. (A Thesis in the Department of Building, Civil and Environmental Engineering). Concordia University, Montreal. (in English)
 21. Elshukri, F. A. (2016). *An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints (IRJs) end Post Performance*. (A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy). The University of Sheffield, Sheffield. (in English)
 22. Elshukri, F. A., & Lewis, R. (2016). An Experimental Investigation and Improvement of Insulated Rail Joints. *Tribology in Industry*, 38(1), 121-126. (in English)
 23. Oregui, M., Molodova, M., Núñez, A., Dollevoet, R., & Li, Z. (2015). Experimental Investigation into the Condition of Insulated Rail Joints by Impact Excitation. *Experimental Mechanics*, 55(9), 1597-1612. doi: <http://doi.org/10.1007/s11340-015-0048-7> (in English)
 24. Beaty, P., Temple, B., Marshall, M. B., & Lewis, R. (2016). Experimental modelling of lipping in insulated rail joints and investigation of rail head material improvements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(4), 1375-1387. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409715600740> (in English)
 25. Fischer, Sz., & Németh, A. (2017). *Investigation of polymer-composite fishplated glued insulated rail joints in laboratory, as well as in field tests for dynamic effects: Research Report*. Győr: Universitas-Győr Nonprofit Ltd. (in Hungarian)
 26. Lewis, S. R., Lewis, R., Goodwin, P. S., Fretwell-Smith, S., Fletcher, D. I., Murray, K., & Jaiswal, J. (2017). Full-scale testing of laser clad railway track; Case study – Testing for wear, bend fatigue and insulated block joint lipping integrity. *Wear*, 376-377, 1930-1937. doi: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.023> (in English)
 27. Reffye, J. de, & Antoni, M. (2016). *Health monitoring on line of the impedance of the glued isolating joints to improve the availability of the French railway lines, 20e Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement*. Saint-Malo. Retrieved from <https://clck.ru/FLzVH> (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

28. Himebaugh, A. K., Plaut, R. H., & Dillard, D. A. (2008). Finite element analysis of bonded insulated rail joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(3), 142-150. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2007.09.003> (in English)
29. Horvát, F. (2012). *Application of polymer-composite fishplates for glued insulated rail joints: Research Report*. Győr: Széchenyi István Egyetem. (in Hungarian)
30. Goto, K., Minoura, S., Watanabe, T., Ngamkhanong, C., & Kaewunruen, S. (2018). Impact Load Response of PC Rail Joint Sleeper under a Passing Train. *Journal of Physics: Conference Series*, 1106. Retrieved from <https://clck.ru/FPHtF> doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1106/1/012008> (in English)
31. Kabo, E., Nielsen, J. C. O., & Ekberg, A. (2006). Prediction of dynamic train-track interaction and subsequent material deterioration in the presence of insulated rail joints. *Vehicle System Dynamics*, 44(sup1), 718-729. doi: <http://doi.org/10.1080/00423110600885715> (in English)
32. Kaewunruen, S., & Chiengson, C. (2018). Railway track inspection and maintenance priorities due to dynamic coupling effects of dipped rails and differential track settlements. *Engineering Failure Analysis*, 93, 157-171. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.07.009> (in English)
33. Kaewunruen, S., Aikawa, A., & Remennikov, A. M. (2017). Vibration Attenuation at Rail Joints through under Sleeper Pads. *Procedia Engineering*, 189, 193-198. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.031> (in English)
34. Kurhan, D. (2016). Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State. *Acta Technica Jaurinensis*, 9(1), 83-96. doi: <http://doi.org/10.14513/actatechjaur.v9.n1.400> (in English)
35. Mandal, N. K., & Peach, B. (2010). An Engineering Analysis of Insulated Rail Joints: A General Perspective. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(8), 3964-3988. (in English)
36. Mandal, N. K. (2018). *Stress Analysis of Joint Bars of Insulated Rail Joints Due to Wheel/Rail Contact Loadings, the 11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, CM2018*. Delft. (in English)
37. Mayers, A. (2017). The effect of heavy haul train speed on insulated rail joint bar strains. *Australian Journal of Structural Engineering*, 18(3), 148-159. doi: <http://doi.org/10.1080/13287982.2017.1363977> (in English)
38. Rathod, C., Wexler, D., Chandra, T., & Li, H. (2012). Microstructural Characterisation of Railhead Damage in Insulated Rail Joints. *Materials Science Forum*, 706-709, 2937-2942. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.706-709.2937> (in English)
39. Oregui, M., Li, S., Núñez, A., Li, Z., Carroll, R., & Dollevoet, R. (2016). Monitoring bolt tightness of rail joints using axle box acceleration measurements. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(2). Retrieved from <http://clc.am/gFvDkg> doi: <http://doi.org/10.1002/stc.1848> (in English)
40. Nagy, R. (2017). Analytical differences between seven prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods. *Intersections*, 14(1), 14-32. (in English)
41. Nagy, R. (2017). *Analytical differences between six prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods, Computational Civil Engineering 2017, International Symposium*. Iasi. (in English)
42. Nagy, R. (2016). A vasúti pályageometria romlási folyamatának leírása. *Sínek világa*, 58(6), 12-18. (in Hungarian) (in English)
43. Nagy, R. (2017). Description of rail track geometry deterioration process in Hungarian rail lines No. 1 and No. 140. *Pollack Periodica*, 12(3), 141-156. doi: <http://doi.org/10.1556/606.2017.12.3.13> (in English)
44. Zong, N., & Dhanasekar, M. (2017). Sleeper embedded insulated rail joints for minimising the number of modes of failure. *Engineering Failure Analysis*, 76, 27-43. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.02.001> (in English)
45. Németh, A., & Fischer, Sz. (2018). A polimer-kompozit hevederes ragasztott-szigetelt sínkötések (2. rész): Vasúti pályás vizsgálatok. *Sínek világa*, 60, 12-17. (in Hungarian)
46. Németh, A., & Fischer, Sz. (2018). Field tests of glued insulated rail joints with polymer-composite and steel fishplates. In B. Horváth, G. Horváth, B. Gábor (szerk.), *Technika és technológia a fenntartható közlekedés szolgálatában: Közlekedéstudományi Konferencia* (pp. 97-105). Győr: Universitas-Győr Nonprofit Kft. (in Hungarian)
47. Németh, A., & Fischer, Sz. (2019). Field tests of glued insulated rail joints with usage of special plastic and steel fishplates. *Science and Transport Progress*, 2(80), 60-76. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/165874> (in English)
48. Nichoga, V., Storozh, I., & Saldan, O. (2016). Defect Signal Detection within Rail Junction of Railway Tracks. *Problemy Kolejnictwa*, 171, 57-62. (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

49. Yang, Z., Boogaard, A., Wei, Z., Liu, J., Dollevoet, R., & Li, Z. (2018). Numerical study of wheel-rail impact contact solutions at an insulated rail joint. *International Journal of Mechanical Sciences*, 138-139, 310-322. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.02.025> (in English)
50. Nunez, A., Jamshidi, A., & Wang, H. (2019). Pareto-Based Maintenance Decisions for Regional Railways with Uncertain Weld Conditions Using the Hilbert Spectrum of Axle Box Acceleration. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3), 1496-1507. doi: <http://doi.org/10.1109/tii.2018.2847736> (in English)
51. Peltier, D. C., & Barkan, C. P. L. (2009). Characterizing and Inspecting for Progressive Epoxy Debonding in Bonded Insulated Rail Joints. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2117(1), 85-92. doi: <http://doi.org/10.3141/2117-11> (in English)
52. Peltier, D. C., & Barkan, C. P. L. (2008). *Modeling the Effects of Epoxy Debonding on Bonded Insulated Rail Joints Subjected to Longitudinal Loads*, 87th Annual Meeting, 2008 TRB. Washington. Retrieved from <http://clc.am/Q1cqpa> (in English)
53. Gallou, M., Temple, B., Hardwick, C., Frost, M., & El-Hamalawi, A. (2016). Potential for external reinforcement of insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(3), 697-708. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409716684278> (in English)
54. Buggy, S. J., James, S. W., Staines, S., Carroll, R., Kitson, P., Farrington, D., ... Tatam, R. P. (2016). Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors. *Measurement Science and Technology*, 27(5). Retrieved from <http://clc.am/OfQAnA> doi: <http://doi.org/10.1088/0957-0233/27/5/055201> (in English)
55. Luzin, V., Rathod, C., Wexler, D., Boyd, P., & Dhanasekar, M. (2013). Residual Stresses in Rail-Ends from the in-Service Insulated Rail Joints Using Neutron Diffraction. *Materials Science Forum*, 768-769, 741-746. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.768-769.741> (in English)
56. Sandström, J., & Ekberg, A. (2008). Numerical study of the mechanical deterioration of insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 223(3), 265-273. doi: <http://doi.org/10.1243/09544097jrrt243> (in English)
57. Zong, N., Askarnejad, H., Heva, T. B., & Dhanasekar, M. (2013). Service Condition of Railroad Corridors around the Insulated Rail Joints. *Journal of Transportation Engineering*, 139(6), 643-650. doi: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000541](http://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000541) (in English)
58. Heckel, T., Casperson, R., Rühe, S., & Mook, G. (2018). Signal Processing for Non-Destructive Testing of Railway Tracks. *AIP Conference Proceedings*, 1949(1). Retrieved from <http://clc.am/jOUayQ> doi: <http://doi.org/10.1063/1.5031528> (in English)
59. Soylemez, E., & Ciloglu, K. (2016). Influence of Track Variables and Product Design on Insulated Rail Joints. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2545(1), 1-10. doi: <http://doi.org/10.3141/2545-01> (in English)
60. Sueki, T., Kitagawa, T., & Kawaguchi, T. (2017). Evaluation of Acoustic and Vibratory Characteristics of Impact Noise Due to Rail Joints. *Quarterly Report of RTRI*, 58(2), 119-125. doi: http://doi.org/10.2219/rtriqr.58.2_119 (in English)
61. Sysyn, M. P., Kovalchuk, V. V., & Jiang, D. (2018). Performance study of the inertial monitoring method for railway turnouts. *International Journal of Rail Transportation*, 4, 33-42. doi: <http://doi.org/10.1080/23248378.2018.1514282> (in English)
62. Szamos, A. (1991). *Structures and materials of railway superstructure*. Budapest: Közdot. (in English)
63. Sysyn, M., Gerber, U., Kovalchuk, V., & Nabochenko, O. (2018). The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works. *Archives of Transport*, 47(3), 91-107. doi: <http://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6512> (in English)
64. Kovalchuk, V., Sysyn, M., Sobolevska, J., Nabochenko, O., Parneta, B., & Pentsak, A. (2018). Theoretical study into efficiency of the improved longitudinal profile of frogs at railroad switches. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/1(94), 27-36. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139502> (in English)
65. Stephen, J., Hardwick, C., Beaty, P., Lewis, R., & Marshall, M. (2018). Ultrasonic monitoring of insulated block joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233(3), 251-261. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409718791396> (in English)
66. Nicoli, E., Dillard, D. A., Dillard, J. G., Campbell, J., Davis, D. D., & Akhtar, M. (2011). Using standard adhesion tests to characterize performance of material system options for insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(5), 509-522. doi: <http://doi.org/10.1177/2041301710392481> (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

-
67. Wöhrhart, A. (2011). *ÖBB Infrastruktur AG: ÖBB Infrastruktur szigetelt kötés leírás. Nagyszilárdságú csavarkötéssel készült szigetelt sínillesztések*. Retrieved from <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/QgrcJHsHlItHGdfHRzQFTtBmPxKvlzMKthg?projector=1&messagePartId=0.1> (in Hungarian)
68. Yang, Z., Deng, X., & Li, Z. (2019). Numerical modeling of dynamic frictional rolling contact with an explicit finite element method. *Tribology International*, 129, 214-231. doi: <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.028> (in English)
69. Zong, N., Wexler, D., & Dhanasekar, M. (2013). Structural and Material Characterisation of Insulated Rail Joints. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(1), 75-87. (in English)

Received: Jan. 31, 2019

Accepted: May 27, 2019

UDC 625.1.032.43

O. M. PATLASOV¹, E. M. FEDORENKO^{2*}¹Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648^{2*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 868 53 59, e-mail rapunzeeelliza@gmail.com, ORCID 0000-0002-7518-9106IMPACT OF CARS WITH 25 TF/AXLE LOAD ON THE TRACK
CONDITION

Purpose. The research is aimed at determining changes in the state of the geometrical parameters of the railway track, depending on the passing tonnage in dynamic interaction with the 25 tf/axle load rolling stock.

Methodology. For data acquisition, the authors carried out a statistical analysis of the indicators of digital measurements of the track condition by KVL-P track-measuring cars. Using the program of calculating the mean-square deviation of the geometric parameters of the track, the deviation of the track parameters within the test sections was estimated.

Findings. During the observation period it was found that on average the intensity of track strain accumulation increases. However, according to the results of the factor dispersion analysis with 0.95 probability, it is impossible to unequivocally state the impact of the factor of using the cars with an axial load of up to 25 tf/axle on the deterioration of the track condition parameters. Herewith it should be noted that the share of cargo carried in the cars with axial load of up to 25 tf/axle during the observation period was less than one per cent. According to the values of the mean-square deviation, the state of the geometrical parameters of the track and their predicted changes were estimated, which showed that the increased axial load will lead to decreased life of the rails, which are the most expensive elements of the track structure, shortened service life of the railroad switches and increased labor costs for workers involved in track repair and maintenance. The corresponding reduction of inter-repair periods, which corresponds to the standards, is projected. In order for heavy-duty wagons not to destroy the infrastructure, there must be at least two limitations: by the types of goods transported and by the speed of movement.

Originality. The authors conducted a study to assess the impact of cars with 25 tf/axle load on the state of the geometric parameters of the railway track and proposed solutions to the issue of introducing the 25 tf/axle load rolling stock in Ukraine.

Practical value. On the basis of the obtained results it is possible to estimate the impact of the axial load on the intensity of the track condition changes and to predict the reduction of inter-repair periods in connection with the track deterioration and in accordance with the train speed restriction.

Keywords: railway track; cost standards; stress; vertical and lateral forces; axle load

Introduction

The increase in freight capacity on the Ukrainian railways is closely related to increased axle load. In recent years, in many countries of the European Union (EU) with 1520 mm gauge, the axle load is 25 tf/axle in accordance with the technical specifications [8]. In addition to the EU, such axle load was introduced by the countries neighboring to Ukraine, namely Russia, Byelorussia, the Baltic States.

In Ukraine, the axle load is 23.5 tf/axle, which is a restraining factor in the organization of transit freight transportation. In addition, at present, Ukraine already has a rolling stock with an axle load of 25 tf/axle, which must meet the conditions of wear-life and durability. In the case of limited

funding, the introduction of axle load of 25 tf/axle can lead to a significant deterioration of the track and hence to the restriction of train speed, as reflected in the scientific works of domestic and foreign scientists [1, 2, 3, 4, 13, 14–19, 20].

Taking into account the above, increase in the axial load can lead to increased costs for materials and labor, which will undermine the introduction of heavy cars.

Purpose

Increasing the carrying capacity of cars up to 25 tons per axle is considered as one of the priority directions of railways development. It is estimated that the productivity of such cars is higher by 7-10% due to increased inter-repair mileage and

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

reduced traction costs assuming transportation of one ton of cargo. But a heavier car wears the track more intensely [9].

In order to solve the problem issues, the authors of the article aim to analyse the changes in the state of the geometric parameters of the railway track, depending on the passed tonnage in dynamic interaction with the rolling stock, the axle load of which is 25 tf/axle.

Methodology

The work was carried out by the employees of the Track and Track Facilities Department and the Track-Testing Branch Research Laboratory, which is accredited as part of the testing center of the DNURT (accreditation certificate of NAAU No. 2N0011).

These tests were carried out in accordance with the program and methodology of conducting tests of impact on the track of the 25 tf/axle load rolling stock, heavy-duty trains. In order to obtain statistical data, the program envisaged assessing the impact of cars with an axle load of 25 tf/axle on the state of the geometric parameters of the railway track, as well as comparing them with the projections.

Statistical surveys were conducted on a single-gauge section of r.st. Ukrainska – r.st. Kakhovske Sea (PCh-4 Melitopol, regional branch of «Prydniprovskia Railways»). The section is one-track railway, of the V-VI track category. With the density of freight traffic $G = 5.5$ million tons km gross / km per year, the tonnage passed during the observation period is 225 million tons gross. The station Dniprorudne is located on the section.

Given that from the side of railway station Kakhovske Sea to the railway station Dniprorudne all cars go with a load of 23.5 tf/axle, and from r.st. Dniprorudne to r.st. Ukrainska – tested cars with load of up to 25 tf/axle, two test sections were considered separately:

1) From 30 to 22 km of the block r.st. Kakhovske Sea – r.st. Dniprorudne, rolling stock with axial load of up to 23.5 tf/axle.

2) From 20 to 3 km of the block r.st. Dniprorudne – r.st. Ukrainska, rolling stock with 25 tf/axle load [3].

Equipping of track measuring means and track facilities with modern computer technology can significantly improve methods for assessing the

geometry of rail track and expand the range of practical problems solved by these methods.

As it is known, for estimating the track state and planning the track work, some European railways use the mean square deviation (MSD) of the track geometric parameters (TGP) and the forecasts of their changes. For example, this practice is adopted at the railways of Austria, Great Britain, the Netherlands, and others [10].

MSD is the most common index of dispersion of the random variable values relative to its mathematical expectation.

MSD shows how much the average value of a characteristic deviates from its average value.

Since the magnitude of MSD characterizes the deviation of the track across the entire considered front, it allows us to estimate the actual state of the track on the experimental section [9].

In this case, a linear model is used that describes the variability of the MSD of TGP depending on the tonnage passed along the track section.

The mean square deviation is always greater than the mean linear deviation.

A small value of the mean square deviation indicates that these points are closer to the mean (mathematical expectation) of the sample, while large values of the standard deviation indicate that the points are distributed in a wider range of values.

The practical use of MSD for data sampling is to estimate the magnitude of how much they deviate from the mean value.

The initial data used for the studies of the actual track state with the help of MSD of TGP were the results of measurements of the track state by KVL-P railroad cars.

In our studies, for this purpose, we obtained copies of the electronic files with the records of the results of the track-measuring car passage along some sections of the Prydniprovskia Railways.

The TGP MSD calculation program is developed at the Track and Track Facilities Department of DNURT in MS Excel. This program allows you to evaluate the MSD of the track geometrical parameters within the experimental sections. Converting the records of track-measuring cars we obtained a tabular data on six geometric indicators of the track state (pocket of the left and right lines, position in plan of the left and right lines, pattern, level) [8]. Information on each indicator was considered at intervals of approximately 1.84 m.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Findings

In order to analyze the track state according to the proposed method, all records of the track-measuring car for April – November 2018 are processed. Each electronic file is recognized and included in a document with the name of the sheet, which corresponds to the month and year.

The track state indicators for April 2018 on the 1st section are shown in Fig. 1

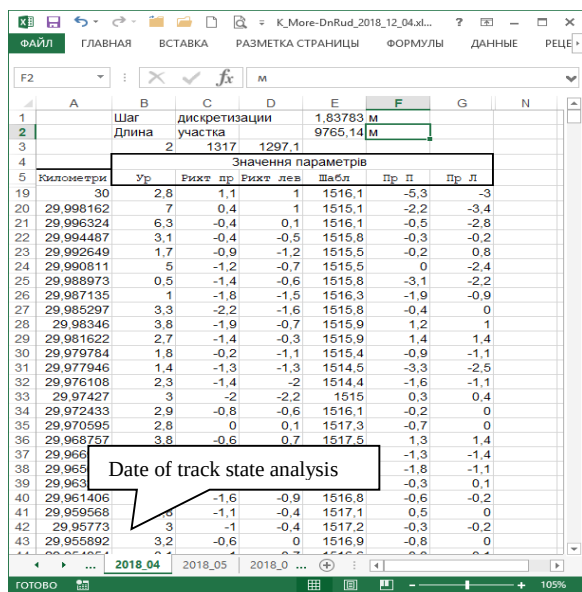


Fig. 1. Explanation of electronic file for April 2018 (2018_04)

Taking into account the lack of accuracy, when binding the measurement commencement to the distance in kilometers, at first all records (for each month) were adjusted in such a way that the initial base would coincide.

Also, taking into account that during measurements a slip of a measuring wheel can occur, the given step (1.84 m) may differ from the actual one in different trips. This step in the data for each month of observations was also corrected (Fig.2).

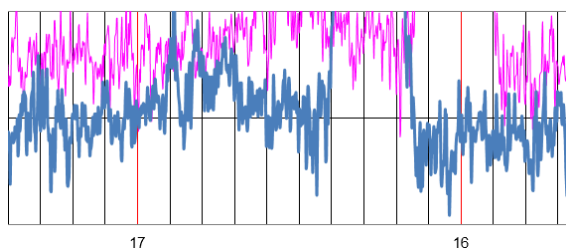


Fig. 2. Non-coincidence of highs at the end of the section

According to the proposed method, all records of the track-measuring car for April – November 2018 were processed. The information for each month was stored in a separate sheet MS EXEL with the sheet name corresponding to the month and year.

For each value of the indicator its deviation from the mobile mean value was calculated (Fig. 3).

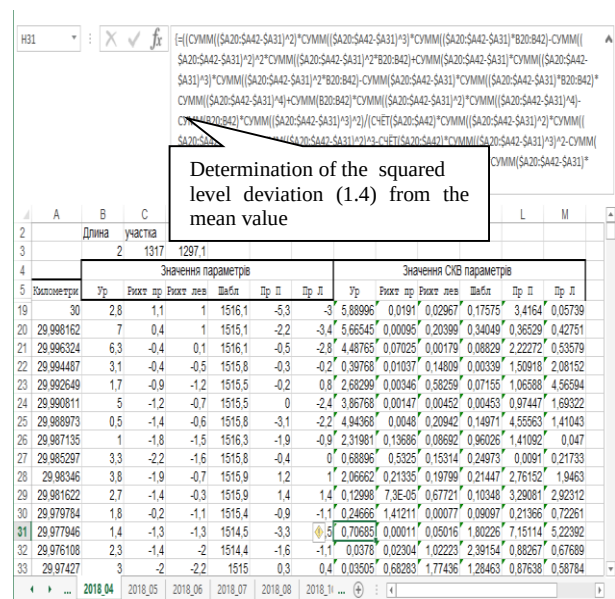


Fig. 3. Dependence of horizontal forces on running speed

Upon defining the MSD of all parameters for each kilometer of each section, we built the consolidated tables and the charts of MSD change by the passed tonnage (monthly data tied to the passed tonnage).

The deviation of a certain value from the middle line was found by approximating the values located at a distance of 50 meters before and after this value. Approximation is carried out according to the polynomial of the second order.

After composing the equations, we constructed the mean square deviation graphs. The graphs are shown in Figures 4.

To sum up these figures, the mean value is given, determined by the formula:

$$S = \frac{L + RL + LL + RP + LP + P}{6} \quad (1)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

where L – level in mm; RL – right levelling in mm; LL – left levelling in mm; RP – right pocket in mm; LP – left pocket in mm; P –pattern in mm.

Samples of MSD changes are depicted in Figure 3. The graphs show the equations of the trend lines, which determined the intensity of the change in MSD for the test period for each kilometer.

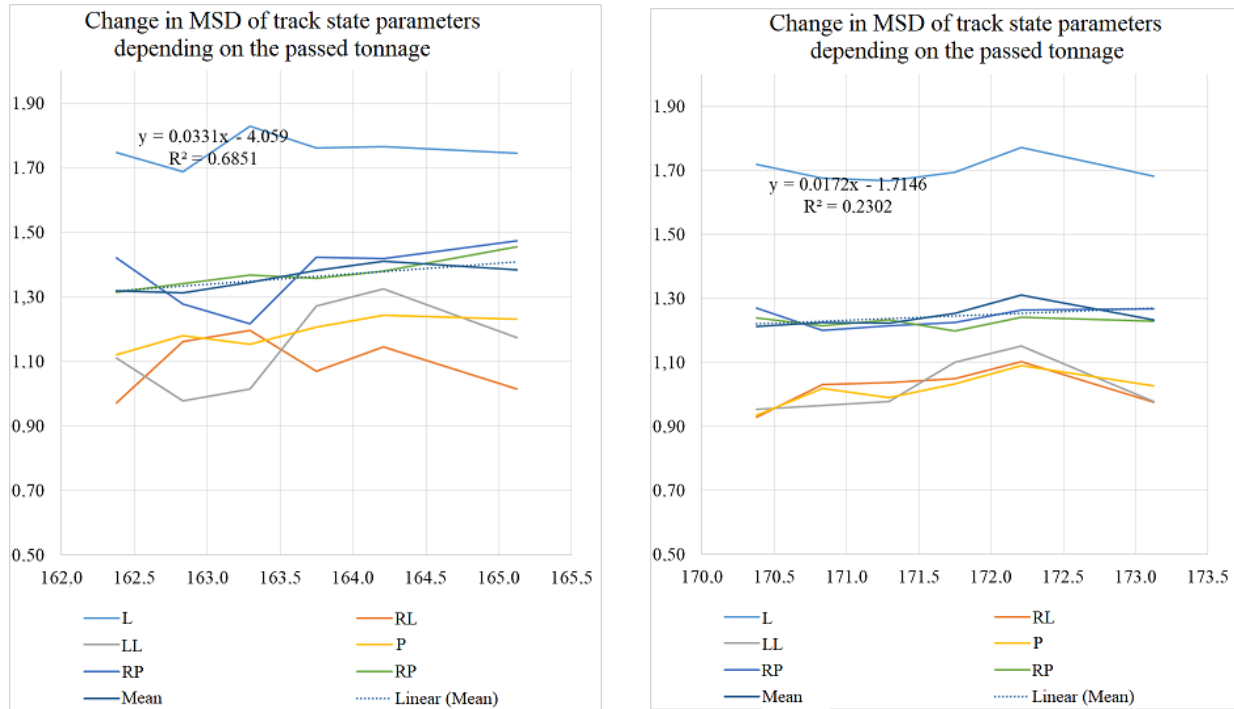


Fig. 4. Change in mean square deviation on the section of 22-30 km (23.5 t/axle) and 3-18 km (25 t/axle)

Upon determining the intensity of the change in MSD of TGP depending on the passed tonnage in the sections of r.st. Kakhovske Sea – r.st. Ukrain-ska, by means of factor dispersion analysis we estimated the influence of the axial load on the intensity of track state changes [7].

From the charts it is seen that the intensity increases by 20%, therefore one can conclude that the axial load affects the state of track geometric parameters. But given the significant spread of these values, we conducted the factor analysis.

To do this, all the received intensities (for kilometers) are divided separately for sections 1 (up to 23.5 t/axle) and 2 (up to 25 t/axle). Output data and the results of the conducted factor analysis are presented in Fig. 4.

The factor dispersion analysis confirmed that, with a probability of 0.95, it cannot be asserted that during the observation period, the axial load affected the intensity of the growth of track irregularities.

It should be noted that with the density of freight traffic along the section of 5.5 million tkm/km per year, during the period of observations (April-October 2018) $5.5/12 \cdot 6 = 2.75$ million tons of cargo was passed, while the cars with an axial load of up to 25 t/axle transported about 3 ths. tons, which was about 0.1 per cent.

It should also be noted that according to Fig. 3, the average intensity of the growth of track irregularities on the sections with axial load up to 23.5 t was 0.0144 mm/m.t, while on the sections with axial load up to 25 tf – 0.0172 mm/m.t.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Increase in intensity under axial loads							
to 23.5 t	to 25 t						
0.0451	0.0451	Single-factor dispersion analysis					
-0.0225	0.0224	RESULTS					
0.0157	-0.001	Groups	Count	Sum	Mean	Dispersion	
0.0289	0.0451	to 23.5 t	9	0.2689	0.029878	0.00142949	
0.0206	0.0451	to 25 t	18	0.4489	0.024939	0.00075361	
0.0156	0.0451						
0.1134	0.0451	Dispersion analysis					
0.048	0.0451	Source of variation	SS	df	MS	F	P-value
0.0041	0.0229	Between groups	0.0001	1	0.000146	0.15089902	0.70096619
	0.0142	Inside groups	0.0242	25	0.00097		4.24169905
	0.0356	Total	0.0244	26			
	0.0137						
	0.0363						
	0.0086						
	0.0577						
	0.0409						
	-0.03						
	-0.043						

Fig. 5. Factor dispersion analysis of impact of 25 t/axle load cars on the intensity of track deterioration increase

Originality and practical value

The research was conducted for the possibility of estimating the impact of cars with 25 t/axle load on the state of geometrical parameters of the railway track and suggested the ways of solving the issue of introducing the 25 t/axle load rolling stock in Ukraine.

Conclusions

Having performed the analysis of the change in MSD of TGP depending on the density of freight traffic, the passed tonnage and the repairs, having obtained the general mean adjusted value in the sections of r.st. Ukrainska – r.st. Kakhovske Sea before and after the modernization, we see that the general mean adjusted value of MSD of TGP on the track sections Ukrainska – Kakhovske Sea is equal to 1.62 mm.

We analysed the changes of the MSD of TGP depending on the density of freight traffic on the track sections Ukrainska – Kakhovske Sea and

made the conclusion that at the same volume of the passed tonnage the value of the freight traffic density does not affect the value of the MSD of TGP.

The obtained MSD of TGP allow to give an assessment of the track state and to plan the performance of track work, including track repair with greater efficiency than by the existing norms. Before and after the repairs, it would be advisable to carry out the analysis of the MSD of TGP and to further assess the track state and plan the track repair in accordance with this method according to the actual state of the track.

Thus, we can conclude that in order to obtain the MSD in both direct and circular curves and ease curves, the basic value for determining deviations can be found by approximating the actual values by the second order polynomial.

With the continuous introduction of 25-t/axle load cars, the track maintenance cost will increase by 6-8%. We recommend the corresponding reduction of inter-repair periods, which corresponds to the standards stipulated [7].

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – Москва : Транспорт, 1986. – 559 с.
2. Влияние высоких осевых нагрузок на режим работы пути // Железные дороги. ИССО транспортных магистралей : Экспресс-информация. – Москва : ВНИИТ. – 1990. – № 43. – С. 16–18.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

3. Патласов, А. М. Влияние осевой нагрузки, вида промежуточных ремонтов пути и сроков их проведения на сопротивление движению подвижного состава / А. М. Патласов // Исследование взаимодействия пути и подвижного состава : межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1991. – Вып. 283/32. – С. 39–45.
4. Интенсивность накопления остаточных деформаций пути при воздействии вагонной нагрузки 250 Кн/ось / С. В. Амелин, М. П. Смирнов, Л. И. Блажко, В. И. Смирнов. – Ленинград : Ленингр. ин-т инж. трансп, 1982. – 73 с.
5. Метрологія та стандартизація в теплоенергетиці [Electronic resource] : підручник / уклад. Кєсова Л. О., Промоскаль В. І., Червоний В. В. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 451 с. – Available at: <https://bitly.su/yBfp9N> – Title from the screen. – Accessed : 06.06.2019.
6. Патласов, А. М. Совершенствование системы планирования ремонтов железнодорожного пути : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Александр Михайлович Патласов ; Петербург. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Санкт-Петербург, 1991. – 167 с.
7. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП-0287 : затв. наказом Укрзалізниці від 03.11.2014 № 470-ЦЗ / А. Бабенко, Г. Линник, К. Мойсєєнко [та ін.]. – Київ, 2015. – 45 с.
8. Директива (ЄС) 2016/797 Європейського Парламенту та Ради від 11 травня 2016 про інтероперабельність залізничної системи в рамках Європейського Союзу [Electronic resource] // Офіційний Журнал Європейського Союзу. – 2016. – 61 с. – Available at: <http://doszt.gov.ua/content/media/Direktiva-797-UA.pdf> – Title from the screen. – Accessed : 06.06.2019.
9. Рыбкин, В. В. Напряженно-деформированное состояние пути при взаимодействии вагонов с повышенной осевой нагрузкой / В. В. Рыбкин, А. М. Патласов, В. И. Климов // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкций подвижного состава : тез. докл. Всесоюз. конф. (Днепропетровск, май 1988 г.). – Днепропетровск, 1988. – С. 96.
10. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0267. – Київ : Поліграфсервіс, 2012. – 40 с.
11. Уманов, М. И. Совершенствование оценки состояния пути с использованием среднеквадратических отклонений его геометрических параметров / М. И. Уманов, А. М. Патласов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 109–114.
12. Эсвельд, К. Планирование путевых работ с применением ЭВМ / К. Эсвельд // Железные дороги мира. – 1991. – № 1. – С. 45–47.
13. Шахунянц, Г. М. Нагрузки, скорости, грузонапряженность, путь / Г. М. Шахунянц // Труды МИИТ. – 1973. – Вып. 443. – С. 3–97.
14. Increasing axle load in Europe State of the art and perspectives [Electronic resource] / I. Korpanec, E. Rebeyrotte, M. Guigon, L. Tordai // 8th International Heavy Haul Conference, 2005. – Available at: <https://u.to/sd26FQ> – Title from the screen. – Accessed : 24.05.2019.
15. Ekberg, A. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview / A. Ekberg, E. Kabo // Wear. – 2005. – Vol. 258. – Iss. 7-8. – P. 1288–1300. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.039039>
16. Fischer, S. Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method / S. Fischer // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2017. – Vol. 61, No. 4. – P. 794–802. doi: <https://doi.org/10.3311/ppci.8549>
17. Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the «Underframe-Track» System Interaction / I. Klimenko, L. Černiauskaite, L. Neduzha, O. Ochkasov // Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS'2018 : The 12th International Conference (April 26–27, 2018, Panevėžys) / Kaunas University of Technology. – Kaunas, 2018. – P. 105–114.
18. Normalised curvature square ratio for detection of ballast voids and pockets under rail track sleepers [Electronic resource] / S. Kaewunruen, R. Janeliukstis, A. Freimanis, K. Goto // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1106. – Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1106/1/012002/meta> – Title from the screen. – Accessed : 24.05.2019. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1106/1/012002>
19. Sandstrom, A. Predicting crack growth and risks of rail breaks due to wheel flat impacts in heavy haul operations / J. Sandström, A. Ekberg // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2009. – Vol. 223. – Iss. 2. – P. 153–161. doi: <https://doi.org/10.1243/09544097jrrt224>

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

20. Smith, R. A. The wheel-rail interface – some recent accidents / R. A. Smith // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2003. – Vol. 26. – Iss. 10. – P. 901–907. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00701.x>

О. М. ПАТЛАСОВ¹, Є. М. ФЕДОРЕНКО^{2*}

¹Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{2*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 868 53 59, ел. пошта rapunzeeelliza@gmail.com, ORCID 0000-0002-7518-9106

ВПЛИВ ВАГОНІВ З ОСЬОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ 25 ТС/ВІСЬ НА СТАН ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. Дослідження спрямоване на визначення змін у стані геометричних параметрів залізничної колії залежно від пропущеного тоннажу за динамічної взаємодії з рухомих складом із навантаженням 25 тс/вісь. **Методика.** Для досягнення мети автори провели статистичний аналіз показників вимірювань стану колії вагонами-колійними вимірювачами типу КВЛ–П. За допомогою програми розрахунку середньоквадратичного відхилення геометричних параметрів колії оцінено відхилення параметрів у межах дослідних ділянок. **Результати.** За період спостережень виявлено, що інтенсивність накопичення деформації колії в середньому зростає. Однак за результатами факторного дисперсійного аналізу з ймовірністю 95 % не можна однозначно стверджувати про вплив вагонів з осьовим навантаженням до 25 тс/вісь на погіршення показників стану колії. При цьому слід зазначити, що частка вантажу, перевезеного у вагонах з осьовим навантаженням до 25 тс/вісь, за період спостережень склала менше одного відсотка. За показниками величини середньоквадратичного відхилення оцінено стан геометричних параметрів колії та їх прогнозні зміни. Аналіз показав, що підвищення осьового навантаження призведе до зменшення ресурсу експлуатації рейок, які є найдорожчими з елементів верхньої будови колії, скорочення терміну служби стрілочних переводів і збільшення витрат праці робітників, зайнятих ремонтом і утриманням колії. Рекомендовано скорочення міжремонтних періодів, яке відповідає нормативам. Для того, щоб великовантажні вагони не руйнували інфраструктуру, має діяти як мінімум два обмеження: за видами вантажів, які перевозять, і за швидкістю руху. **Наукова новизна.** Авторами провели дослідження оцінки впливу вагонів з осьовим навантаженням 25 тс/вісь на стан геометричних показників залізничної колії й запропонували шляхи вирішення питання щодо впровадження в Україні рухомого складу з осьовим навантаженням 25 тс/вісь. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можна оцінити вплив осьового навантаження на інтенсивність змін стану колії та прогнозувати скорочення міжремонтних термінів у зв'язку з його погіршенням і відповідно до обмеження швидкості руху поїздів.

Ключові слова: залізнична колія; норми витрат; напруження; вертикальні й бокові сили; осьове навантаження

А. М. ПАТЛАСОВ¹, Е. М. ФЕДОРЕНКО^{2*}

¹Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{2*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 868 53 59, эл. почта rapunzeeelliza@gmail.com, ORCID 0000-0002-7518-9106

ВЛИЯНИЕ ВАГОНОВ С ОСЕВОЙ НАГРУЗКОЙ 25 ТС/ОСЬ НА СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Исследование предусматривает определение изменений в состоянии геометрических параметров железнодорожного пути в зависимости от пропущенного тоннажа при динамическом взаимодействии с подвижным составом с нагрузкой 25 тс/ось. **Методика.** Для достижения цели авторы провели статистический анализ показателей измерений состояния пути вагонами-путеизмерителями типа КВЛ–П. С помощью программы расчета среднеквадратического отклонения геометрических параметров оценены отклонения параметров в пределах опытных участков. **Результаты.** За период наблюдений выявлено, что интенсивность накопления деформации пути в среднем возрастает. Однако по результатам факторного дисперсионного анализа с вероятностью 95 % нельзя однозначно утверждать о влиянии вагонов с осевой нагрузкой до 25 тс/ось на ухудшение показателей состояния пути. При этом следует отметить, что доля перевозимого груза в вагонах с осевой нагрузкой до 25 тс/ось за период наблюдений составила менее одного процента. По показателям величины среднеквадратических отклонения оценено состояние геометрических параметров пути и их прогнозные изменения. Анализ показал, что повышение осевой нагрузки приведет к уменьшению ресурса эксплуатации рельсов, которые являются самым дорогим элементом верхнего строения пути, сокращению срока службы стрелочных переводов и увеличению затрат труда работников, занятых ремонтом и содержанием пути. Рекомендовано сокращение межремонтных периодов, которое соответствует нормативам. Для того чтобы большегрузные вагоны не разрушали инфраструктуру, должны действовать как минимум два ограничения: по видам перевозимых грузов и по скорости движения. **Научная новизна.** Авторы провели исследование для оценки влияния вагонов с осевой нагрузкой 25 тс/ось на состояние геометрических показателей железнодорожного пути и предложили пути решения вопроса по внедрению в Украине подвижного состава с осевой нагрузкой 25 тс/ось. **Практическая значимость.** На основе полученных результатов можно оценить влияние осевой нагрузки на интенсивность изменений состояния пути и прогнозировать сокращение межремонтных сроков в связи с его ухудшением и в соответствии с ограничением скорости движения поездов.

Ключевые слова: железнодорожный путь; нормы расходов; напряжение; вертикальные и боковые силы; осевая нагрузка

REFERENCES

1. Verigo, M. F., & Kogan, A. Y. (1986). *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava*. Moscow: Transport. (in Russian)
2. Vliyanie vysokikh osevykh nagruzok na rezhim raboty puti. (1990). *Zheleznye dorogi. ISSO transportnykh magistraley: Ekspres-informatsiya*, 43, 16–18. (in Russian)
3. Patlasov, A. M. (1991). Vliyanie osevoy nagruzki, vida promezhutochnykh remontov puti i srokov ikh provedeniya na soprotivlenie dvizheniyu podvizhnogo sostava. *Issledovanie vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava*, 283(32), 39–45. (in Russian)
4. Amelin, S. V., Smirnov, M. P., Blazhko, L. I., & Smirnov, V. I. (1982). *Intensivnost nakopleniya ostatochnykh deformatsiy puti pri vozdeystvii vagonnoy nagruzki 250 Kn/os*. Leningrad. (in Russian)
5. Kiesova, L. O., Promoskal, V. I., & Chervonyi, V. V. (2018). *Metrolohiia ta standartyzatsiia v teploenerhetytsi: pidruchnyk*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. Retrieved from <https://bitly.su/yBfp9N>
6. Patlasov, A. M. (1991). *Sovershenstvovanie sistemy planirovaniya remontov zheleznodorozhnogo puti*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Petersburg State Transport University, St. Petersburg. (in Russian)
7. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robot na zaliznytsiakh Ukrainy: TsP-0287*. (2015). Kyiv. (in Ukrainian)
8. Dyrektyva (IeS) 2016/797 Yevropeiskoho Parlamentu ta Rady vid 11 travnia 2016 pro interoperabelnist zaliznychnoi systemy v ramkakh Yevropeiskoho Soiuzu. (2016). Retrieved from <http://doszt.gov.ua/content/media/Direktiva-797-UA.pdf> (in Ukrainian)
9. Rybkin, V. V., Patlasov, A. M., & Klimov, V. I. (1988). *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie puti pri vzaimodeystvii vagonov s povyshennoy osevoy nagruzkoj, Problemy mekhaniki zheleznodorozhnogo transporta. Povyshenie nadezhnosti i sovershenstvovanie konstruksiy podvizhnogo sostava: tezisy dokladov Vsesoyuznoy konferentsii*. Dnepropetrovsk. (in Russian)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

10. *Tekhnichni vказivky shchodo otsinky stanu reikovoї kolii za pokaznykamy koliiєvmiriuvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poїzdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovoї kolii: TsP-0267*. (2012). Kyiv: Poligrafservis. (in Ukrainian)
11. Umanov, M. I., & Patlasov, A. M. (2012). Sovershenstvovanie otsenki sostoyaniya puti s ispolzovaniem srednekvadraticeskikh otkloneniy ego geometricheskikh parametrov. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 40, 109-114. (in Russian)
12. Essveld, K. (1991). Planirovanie putevykh rabot s primeneniem EVM. *Railways of the World*, 1, 45-47. (in Russian)
13. Shakhunyants, G. M. (1973). Nagruzki, skorosti, gruzonapryazhennost, put. *Trudy MIIT*, 443, 3-97. (in Russian)
14. Korpanec, I., Rebeyrotte, E., Guigon, M., & Tordai, L. (2005). *Increasing axle load in Europe State of the art and perspectives, 8th International Heavy Haul Conference, 2005*. Retrieved from <https://u.to/sd26FQ> (in English)
15. Ekberg, A., & Kabo, E. (2005). Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview. *Wear*, 258(7-8), 1288-1300. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.039039> (in English)
16. Fischer, S. (2017). Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(4), 794-802. doi: <https://doi.org/10.3311/ppci.8549> (in English)
17. Klimenko, I., Černiauskaite, L., Neduzha, L. & Ochkasov, O. (2018). *Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the «Underframe-Track» System Interaction, Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS'2018*. Kaunas. (in English)
18. Kaewunruen, S., Janeliukstis, R., Freimanis, A., & Goto, K. (2018). Normalised curvature square ratio for detection of ballast voids and pockets under rail track sleepers. *Journal of Physics: Conference Series*, 1106. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1106/1/012002> (in English)
19. Sandström, J., & Ekberg, A. (2008). Predicting crack growth and risks of rail breaks due to wheel flat impacts in heavy haul operations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 223(2), 153-161. doi: <https://doi.org/10.1243/09544097jrrt224> (in English)
20. Smith, R. A. (2003). The wheel-rail interface – some recent accidents. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26(10), 901-907. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00701.x> (in English)

Received: Jan. 24, 2019

Accepted: May 23, 2019

UDC 625.141-044.963

E. JUHASZ^{1*} S. FISCHER^{2*}^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Széchenyi István University, Egyetem tér 1., Győr, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 544, e-mail juhasz.erika@sze.hu, ORCID 0000-0002-5544-3146^{2*}Dep. «Transport Infrastructure», Széchenyi István University, Egyetem tér 1., Győr, Hungary, 9026, tel. + 36 (96) 613 544, e-mail fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

SPECIFIC EVALUATION METHODOLOGY OF RAILWAY BALLAST PARTICLES' DEGRADATION

Purpose. The most railway lines in the world have so called traditional ballasted superstructure. The authors think that it is important to learn about the process of ballast degradation. There are only two types of standardized laboratory test methods in the EU to assess railway ballast particle degradation and describe the rock physic characteristics, but are not suitable for modelling the railway stress-strain circumstances of ballast materials, and they particles. In this paper the authors represent some conclusions from their research that the authors experienced during their individual fatigue laboratory test and from new additional tests. With these kind of testing methods, the deterioration process of railway ballast particles can be assessed more realistic and precisely. **Methodology and new directions.** There are two types of laboratory tests which are presented in this article. The first one was performed by using a shear box with a special layer structure that is loaded by dynamic, pulsating force; while the second one was executed by using a 140 mm diameter HDPE tube with its original closing element that is loaded by ZD-40 machine. **Findings and problems.** There is a development after the R&D work made and published in 2014, in 2017 and 2018 years the ballast particle deterioration process is given according to more intermediate fatigue cycles with individual measurements that show more precise «picture» about the full particle degradation, i.e. breakage process. The authors give more accurate correlation functions between the calculated parameters and load cycles during fatigue. However, there are many factors in the test that need to be improved in the future. Therefore, the authors have discovered other additional tests. **Originality.** The most important goal of the authors that supplement the currently used regulation with new measurement methods. **Practical value** The authors' developed and new methods may serve as a basis for a future instruction or regulation. The publishing of this paper was supported by EFOP 3.6.1-16-2016-00017 project.

Keywords: individual laboratory test method; railway ballast material; particle degradation; breakage; dynamic fatigue test; static pressing test; CT equipment; 3-D image analysis

Purpose

For the railway transport the most widely used superstructure is the ballasted track [23, 24]. The ballast bed bears significant forces and plays important role in load carrying «chain». Each part of the track receives static and dynamic effects in different proportions [1, 2, 50, 52]. The forces and stresses do not transmit consistently in the «sleepers-ballast bed» interface, as well as «grain-grain» connections in the ballast bed. These kinds of effects are the following (without completeness):

- dead weight loading (according to the authors' analysis, it is negligible),
- vehicle forces and effects (on perfect or quite perfect quality track),
- previous geometric and/or structural features on defective track (defects of track geometry,

«hammering» of rails at rail joints, defects of welding...etc.) [1, 2, 4, 38, 39, 40, 41, 50, 52],

- natural and environmental effects (freeze, melt, sunshine, rain, wind, flood, etc.),
- effects at turnouts caused by railway vehicles [50, 52],
- effects at level crossing caused by road vehicles,
- effects of tamping machines' hammers during operation,
- other relevant effects (e.g. other vehicle effects, etc.) [0032, 0034].

The degraded ballasted track cause significant geometric changes that cause structural, stability and drainage problems. These problems could shorten the lifetime of the track even in a short term [1, 50, 51, 52].

In nowadays practice it is obvious aspect that required quality ballast [9, 13, 29, 30, 33, 34, 35,

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

36, 37, 46, 47, 49] is achievable in requested quantity.

It would be important to embed crushed stone materials with better rock physic properties as railway ballast bed. Using these ballast materials would also facilitate production, transportation, installation, operation and maintenance.

In reality, the previous assumption is not evidence: the employed and developed laboratory testing methods by the authors and the MSZ EN 13450:2003 product standard [37] (in Hungary the Modification 4 in MÁV 102345/1995 PHMSZ [30]) can be suitable for redound and raising with the higher volumes of the LA_{RB} and M_{DERB} .

The developed testing method may be a proposal for the elaboration or modification of new assessment and measurement method and the revision of the values' limits.

There are two types of standardized laboratory test methods in the EU which could describe the rock physic characteristics of the railway ballast and determined in the MSZ EN 13450:2003 product standard [37]:

- Los Angeles abrasion test (MSZ EN 1097-2:2010) [0021],
- Micro-Deval abrasion test (MSZ EN 1097-1:2010) [0020].

These laboratory test methods are not suitable for modelling the railway loads in a real manner with the dynamic force and vibration [0035, 0037], but they can be absolutely useable for satisfy defining the abrasion characteristics of a given aggregate sample and for ensure the checking of the quality level. For the objective judgement of conformability special laboratory breakage test has to be used that consider the more real operation circumstances and stresses.

The unique laboratory test method was developed in 2015 [17], because the standardized tests cannot consider the real breakage and abrasion (i.e. loads from vehicles and other effects). The results of the test were compared with the related regulation of MÁV (Hungarian Railways). The individual laboratory test helps to calculate the required time intervals of ballast screening.

The authors research the theme's extensive international literature. Foreign researchers are actively publishing in the research topic, so there is a comprehensive literature in different areas and different methods: laboratory tests; field tests;

DEM and FEM modelling methods and 3D grain shape improvement [6, 14, 15, 22, 31, 32, 42, 43, 48]. Based on this the authors represent the own, individual solution for the unique laboratory test procedure (method) that is able to simulate the stresses more realistic.

The second, additional test is very different from the original one. The authors put ballast particles to a HDPE (water) tube (lined with single layer 1200 g/m² geotextile) with its original closing element and loaded by ZD-40 machine static to an ultimate loading value step by step. Before and after each loading stage, ballast sample – with all the particles in the tube – are scanned by a CT (computer tomography) equipment [7, 10, 11, 25, 26]. Because of loading a small aggregate, almost every particle's degradation is trackable.

Hopefully with this new method the authors can achieve breakthrough results, which may serve as a basis for a later standard.

Methodology and new directions

Individual laboratory test

In 2014 a Research & Development project was completed with the finance support of Colas Északkő Ltd.; the public information was published in [17].

In 2017-2018 laboratory test series with improved parameters and modified circumstances were performed [16, 18, 19, 20, 21, 27].

The authors executed the tests with two types of ballast samples because of the different rock mechanic properties (ballast samples from Colas Északkő Ltd.). The samples' basic properties were different from each other (LA_{RB} and M_{DERB} values). The load cycles were the following: 0.1 million; 0.2 million; 0.5 million; 1 million; 1.5 million, 3 million and 5 million. Every ballast sample should be separate for each fatigue test.

The aspects and detailed parameters of the laboratory test are included in a previous publication [27]. Such parameters which have been taken from the wide literature research are the follows used by the authors to get results:

- F_v (%),
- BBI,
- B_R ,
- $d < 22.4$ mm in mass percentage,
- $d < 0.5$ mm in mass percentage,

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

- $d < 0.063$ mm in mass percentage,
- d_{60}/d_{10} ratio,
- C_c ratio,
- M ratio,
- λ ratio.

The goal was to effort determine mathematical-physical trends and correlation between characteristics (see above point) and loading cycles of fatigue test.

Application of the CT (X-ray) equipment

While there is a wide range of literature available for the 3-D image analysis, the authors found very little source related to testings of railway ballast and/or civil engineer granular materials with CT equipment. The CT (X-ray) equipment is available to the authors in the laboratory of Audi Hungaria Faculty of Automotive Engineering at Széchenyi István University, Győr (Hungary) [7, 10, 11, 25, 26].

X-rays are a form of energy distribution in the family of electromagnetic vibrations. Computer tomography is a development of traditional X-ray screening technology.

The basic data of the device and some relevant data for one measurement can be read in the authors' previous paper [20].

The numbered and 3-D scanned ballast particles are placed in a 140 mm diameter (inner dimension) HDPE tube (originally a water tube) with its original closing element (see Figure 3) and put it into the CT equipment (digitally technic).



Fig. 3. The HDPE tube with the sample

The measurement method is the following (for the 3-step loading):

- washing, drying and numbering of all the stones,
- measuring the weight of the stones and taking photo of all of them,

- inserting the stones into the HDPE tube (lined with single ,
- placing the HDPE tube into the CT equipment and recording CT 3-D model (initial model),
- loading with ZD-40 machine (until 300 kPa),
- another recording by CT equipment (2nd model),
- loading with ZD-40 machine (until 600 kPa),
- another recording by CT equipment (3rd model),
- loading with ZD-40 machine (until 900 kPa),
- another recording by CT equipment (4th model),
- measuring the particles after the loading (weight, photographing),
- washing and drying the particles,
- measuring the weight and photographing once again.

The one-step loading measurement method is very similar to the previous mentioned one, the authors had to save two recording with the CT equipment (before as well as after loading) and the loading was up to 1800 kPa.

X-ray procedure

Homogeneous beam was emitted through the sample, which diffuses and penetrates (it depends on the material) and as a result of the adsorption, the distribution of the quantum of the x-ray changes and weakens in the image plane, blackens the detector to varying degrees. This creates the x-ray images; that depends on the quality of the ballast material. X-rays can also detect tiny cracks after the loading.

Computer tomography procedure

The object under examination is illuminated with a thin, flat X-ray beam. There is a detector which placed behind the object senses where and how much of the beam has been absorbed along a line. In the same plain, the beam is illuminated from several directions, and a drawing of the details in the plain (slice) is drawn from the measured intensity curves. The plain is then pushed away and rotated again. At the end of the procedure, the spatial structure of the test body can be mapped. «Structure» refers to the arrangement of details that can be distinguished from X-ray transmission capability. Modern CT (X-ray) equipment crawls several slices (up to 1260) at a time, and a test can be performed in a few minutes with the necessary

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

calculations. The available CT equipment can be seen in *Figure 4*. *Figure 5* shows an example for measurement.

Basic data of the device, and some relevant data for one measurement:

- A 360° rotation produces 1260 projections (CT-images).
- The number of the lines are 104.
- In case of multi slice: distance between two slices is 210 mm.
- Number of the pixels: 2048 × 2048 (used: 1024 × 1024).
- 2D-pixel size: e.g. 0.19124188 mm.
- 3D-XY-pixel size: e.g. 0.18966927 mm (the edge length of 1 spatial pixel – so called ‘voxel’).
- 3D-Z-pixel size: e.g. 0.1896692 mm.
- X-ray tube: Y.TU 450-D09.
- Tube voltage: 0...450 kV (used 210 kV).
- Current: 2.60 mA (it is related to 210 kV; e.g. 1.213 mA for 450 kV).
- Focus: small.
- Filters:
 - Al: 0.00 mm,
 - Cu: 1.50 mm,
 - Sn: 0.00 mm,
 - Pb: 0.00 mm.
 -

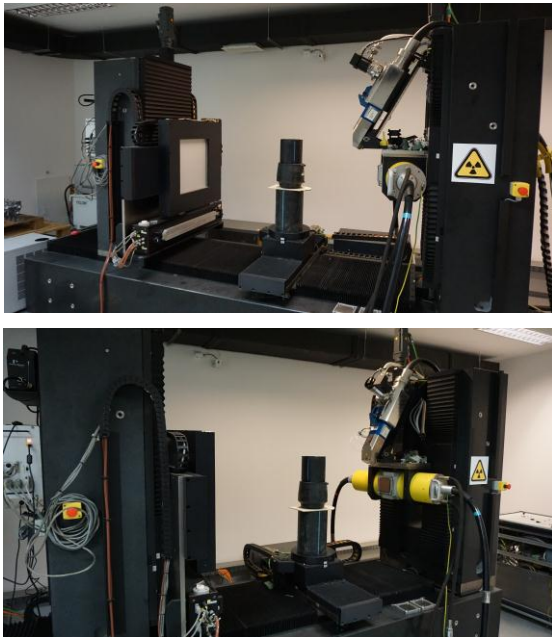


Fig. 4. The CT (X-ray) equipment with the HDPE tube from two viewpoints

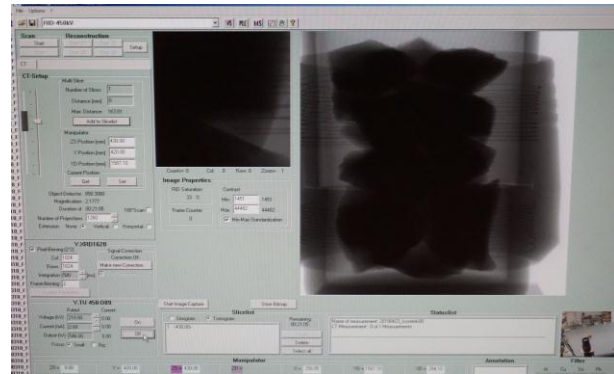


Fig. 5. Preview of a CT measurement, as well as the board of the software

As described above, before and after the loading tests – like the fatigue test – the HDPE tube with the ballast material was scanned by the CT equipment. The authors used CT equipment for the analysis of the breakage. The CT machine’s own software is able to build the spatial frame of the ballast set and the 3-D model could be used in the free software version of GOM 2018 (projection system). The parameters are the following that can be determined by using the 3-D model:

- displacements of the particles,
- volume,
- the set of the particles can be identified.

The weight of the particles after the test was redefined.

After that, the authors performed some loading test with just one-step and the values reached even the 1800 kPa (2000 kPa). The step-by-step loaded and scanned sets can be compared with the software.

Figure 6 and *Figure 7* show some photo from the laboratory measurement.



Fig. 6. Some weighted and numbered particles before loading

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Figure 8 and Figure 9 show 3-D images (models) made by CT (X-ray) equipment. The samples in the HDPE tube were static loaded with compression stresses of given values (in Figure 7 from right to left: 0, 300, 600 and 900 kPa; in Figure 8 from right to left: 0, 1800).



Fig. 7. Numbered particles in the lined HDPE tube before (top) and after (bottom) loading (Test series #3, i.e. maximum compression stress: 1800 kPa)

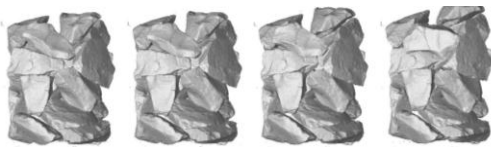


Fig. 8. Recorded 3D images (models) from the loaded aggregates in 3 (4) steps by CT equipment related to test series #2 (from right to left – step #0: before loading, step #1: max. compression stress is 300 kPa, step #2: max. compression stress is 600 kPa, step #3: max. compression stress is 900 kPa)

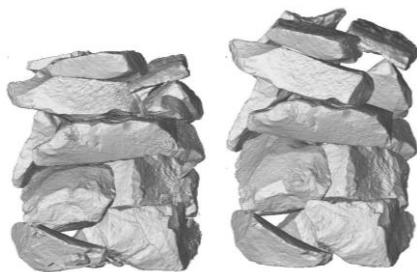


Fig. 9. Recordings from the loaded aggregates in 1 (2) steps related to test series #3 (from right to left – step #0: before loading, step #1: max. compression stress is 1800 kPa)

The authors suppose that the speed of the loading is also a relevant parameter that will be examined in the future.

Findings and problems

In recent papers [16, 17, 18, 19, 20, 21, 27] the relevant correlations were presented in some graphs related to the calculated parameters in case of the individual fatigue laboratory tests.

There is enormous time requirement of this type of testing method, so this is the reason why the authors would like to try to find other measurement methodologies, like the measuring with the CT equipment. It can take 1 to 1.5 month to reach the 5 million cycles in the testing method and the authors used «fresh» ballast material for every measurement (after 100,000, 200,000, 500,000... etc. cycles).

Other problem is the extruded polystyrol layer was significantly deformed during the dynamic test, so in this year the main goal is to evolve the modified layer structure. Changing it for a stiffer and harder layer could help the research in better way.

At the second laboratory tests the evaluation of the results is still ongoing.

The graphs below show the loading curve for the 3-step load and the one-step load (see Figure 10. and Figure 11.).

The loading curves show that they do not reach the upper limit of the load in a straight line, but they move down in certain places. In these places the ballast particles displacements from each other and breaking. With increasing the load, the fractures in the loading curve are increasingly greater.

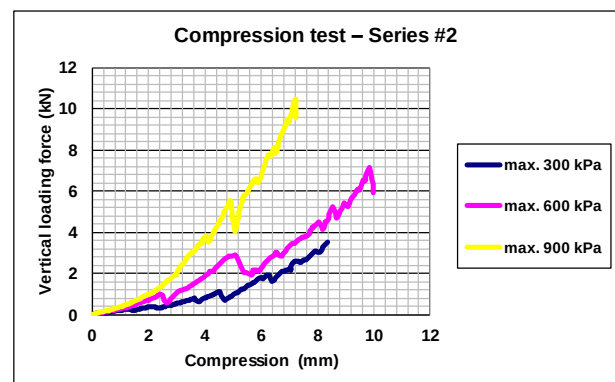


Fig. 10. Loading curves of loadings with max. 300-600-900 kPa compression stress values (3-step loading)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

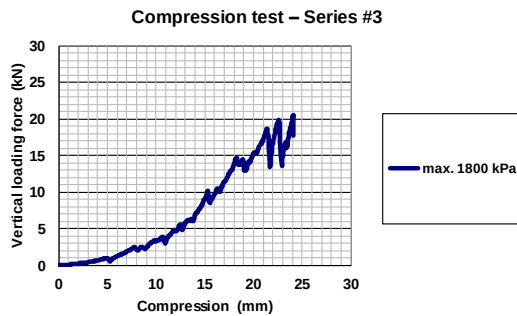


Fig. 11. Loading curve of loading with max. 1800 kPa compression stress value (one-step loading)

The loading curve rises much steeper after every (little) breakpoint.

The preliminary results show the quantity of the «rest» particles from the entire ballast aggregate from the 3-step loading laboratory test (with the HDPE tube). This value calculated from the weight of the original numbered, washed and dried particles without loading and washed and dried particles after the latest loading (it is a percentage value, however it should be taken into account that up to 30% of some stone have broken down). The values can be seen in *Table 1*. The values written with slanted letters show the values that involve the rate of those stones that split into several pieces.

Table 1

The broken particles of the ballast aggregate after 300-600-900 kPa compression stress (the 3-step loading test)

Series number of the tests	The weight of the broken particles [%]
1	0.18%
2	0.14%
3	3.18% (6.26%)
4	1.13%
5	1.06% (3.90%)
6	1.65% (3.64%)

Table 1. shows that none of the samples contains more than 1.7% (with the exception of Series 2#) of the powder of the stone after the latest loading. The percentage of broken stones is also less than 4%, including the number of stones that fell into several larger pieces (not powder, like the previous case).

The authors also investigated that in the tube which particles were broken down mostly of the

rows. *Table 2* show the degradation for each rows (ratio of after-loading-weight and before-loading-weight in percentage).

Table 2

The broken particles of the rows at the 3-step loading test

Series number of the tests	Number of the row	The weight of the broken particles [%]
1	1	0.10%
	2	0.06%
	3	0.13%
	4	0.13%
	5	0.47%
2	1	0.00%
	2	0.27%
	3	0.11%
	4	0.09%
	5	0.27%
	6	0.09%
3	1	5.45%
	2	0.62%
	3	1.28%
	4	5.73%
	5	2.80%
4	1	0.15%
	2	1.59%
	3	2.04%
	4	0.57%
	5	1.17%
5	1	0.24%
	2	0.34%
	3	0.67%
	4	0.31%
	5	4.33%
	6	0.21%
6	1	0.51%
	2	0.05%
	3	0.54%
	4	0.35%
	5	6.68%
	6	0.43%
	7	0.91%

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

According to the values (with the expectation of Series #2) the particles are mostly broken in the lower and middle part (three before the bottom) of the aggregate.

During the test particles in the HDPE tube moved significantly during the test (mainly on top of the aggregate). The authors would like to analyse particle movements in the future.

Originality and practical value

The most important goal of the authors that supplement the currently used regulation with new measurement methods, because the original standardized tests are not loading the samples realistic. The authors' developed and new methods may serve as a basis for a future instruction or regulation.

Conclusions, future scope

The authors would like to reduce the time requirement of newly developed testing methods with improved manner. The authors combine the compression tests with 3-D image analysis (full-field 3-D shape measurement) with the help of CT (X-ray) equipment. The measurement method was

developed, the procedure of evaluation methodology is in progress.

Beside them field tests are planned in the Hungarian railway lines. The authors plan to collect samples from old railway lines where ballast aggregates have known PSD (particle size distribution) at the time of construction.

In the laboratory the authors always work in idealized conditions. This is the reason why the particle breakage values are much higher than the values in real circumstances (see measurement results from 2014 and 2017-2018). Besides, the authors could test only one kind of loadings. Tamping machines also break ballast particles during work, so this kind of effect is also needed to be considered in the future research. Delivery of the crushed stone to the site can also be an important parameter that has to be considered.

The authors plan to work with DEM simulations [12, 44, 45], for this a spatial model must be built. The simulations with the laboratory tests would be comparable.

Acknowledgements

The publishing of this paper was supported by EFOP 3.6.1-16-2016-00017 project.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Курган, Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2015/38250>
2. Ágh, Cs. A new arrangement of accelerometers on track inspection car FMK-007 for evaluating derailment safety / Cs. Ágh // Track Maintenance Machines in Theory and Practice, SETRAS 2018 : Conference Paper (November 2018, Žilina, Slovakia). – Žilina, 2018. – P. 7–14.
3. Ágh, Cs. Egyenértékű kúposág mérése Magyarországon: Pálya és jármű kapcsolata – futási instabilitás / Cs. Ágh // Sínek világa. – 2012. – Vol. 54, No. 6. – P. 10–13.
4. Ágh, Cs. Vágánygeometriai irány- és fekszinthibák valós nagyságának értékelése húrmérési eredmények alapján / Cs. Ágh // Közlekedéstudományi szemle. – 2018. – Vol. 68, No. 5. – P. 46–55.
5. Ágh, Cs. Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből / Cs. Ágh // Sínek világa. – 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 17–20.
6. Al-Saoudi, N. K. S. Behavior of track ballast under repeated loading / N. K. S. Al-Saoudi, K. H. Hassan // Geotechnical and Geological Engineering. – 2014. – Vol. 32. – Iss. 1. – P. 167–178. doi: <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9701-z>
7. Application of Computed Tomography in Structure Analyses of Metal Matrix Syntactic Foams / I. Kozma, I. Zsoldos, G. Dorogi, Sz. Papp // International Journal of Computer Theory and Engineering. – 2015. – Vol. 7. – Iss. 5. – P. 379–382. doi: <https://doi.org/10.7763/IJCTE.2015.V7.989>
8. Arangie, P. B. D. The influence of ballast fouling on the resilient behaviour of the ballast pavement layer / P. B. D. Arangie // 6th International Heavy Haul Railway Conference, IHHA 1997 (6–10 April, 1997, Cape Town, South Africa). – Cape Town, 1997. – P. 241–256.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

9. Claisse, P. Rail ballast: conclusions from a historical perspective / P. Claisse, C. Calla // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*. – 2006. – Vol. 159. – Iss. 2. – P. 69–74. doi: <https://doi.org/10.1680/tran.2006.159.2.69>
10. Computer tomography based reconstruction of metal matrix syntactic foams / I. Kozma, I. Zsoldos, G. Dorogi, Sz. Papp // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol. 58. – Iss. 2. – P. 87–91. doi: <https://doi.org/10.3311/PPme.7337>
11. CT-Based Reconstruction of Metal Foam Composite Material Reinforced with Ceramic Spherical Shell Structure / I. Kozma, I. Zsoldos, G. Dorogi, Sz. Papp // *International Journal of Materials Engineering and Technology*. – 2016. – Vol. 15. – Iss. 2-3. – P. 93–107. doi: <https://doi.org/10.17654/MT015230093>
12. Coupling finite and discrete element methods using an open source and a commercial software / Á. Orosz, K. Tamás, J. P. Rádics, P. T. Zwierczyk // *32nd European Conference on Modelling and Simulation, EMCS 2018* (Wilhelmshaven, Germany, May 22nd–May 26th, 2018). – Wilhelmshaven, 2018. doi: <https://doi.org/10.7148/2018-0399>
13. DB. «TL DBS 918 061: Technische Lieferbedingungen Gleisschotter» (TL DBS 918 061: Technical delivery conditions Railway ballast). – Berlin, 2006/08.
14. Douglas, S. C. Ballast Quality and Breakdown during Tamping / S. C. Douglas // *2013 Joint Rail Conference : Conf. Paper* (Knoxville, Tennessee, USA, April 15–18, 2013). – Knoxville, 2013. – P. 940–955. doi: <https://doi.org/10.1115/JRC2013-2553>
15. Evaluation of Railway Ballast Permeability Using Machine Vision-Based Degradation Analysis / H. Huang, M. Moaveni, S. Schmidt, E. Tutumluer, M. J. Hart // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2018. – Vol. 2672. – Iss. 10. – P. 62–73. doi: <https://doi.org/10.1177/0361198118790849>
16. Fischer, Sz. Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method / Sz. Fischer // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. – 2017. – Vol. 61, No. 4. – P. 794–802. doi: <https://doi.org/10.3311/PPci.8549>
17. Fischer, Sz. Crumbling examination of railway crushed stones by individual laboratory method / Sz. Fischer // *Sínek Világa*. – 2015. – Vol. 57, No. 3. – P. 12–19.
18. Fischer, Sz. Individual rock physics investigations of railway ballast materials [Electronic resource] / Sz. Fischer, A. Németh // *Kő-és Kavicsbányász Napok 2018 : XI Conference*. – Velence, 2018. – Available at: <https://u.to/YmyyFQ> – Title from the screen. – Accessed : 21.06.2019.
19. Fischer, Sz. Special laboratory test for evaluation breakage (particle degradation) of railway ballast [Electronic resource] / Sz. Fischer, A. Németh // *Conference on Transport Sciences* (Győr, 2018, march 22–23). – Győr, 2018. – Available at: <https://u.to/84dpFQ> – Title from the screen. – Accessed : 17.05.2019.
20. Juhász, E. Individual laboratory test method for railroad ballast particle breakage [Electronic resource] / E. Juhász, Sz. Fischer // *Conference on Transport Sciences*. – Győr, 2019. – Available at: <https://u.to/H49pFQ> – Title from the screen. – Accessed : 17.05.2019.
21. Juhász, E. Investigation of railway ballast materials' particle degradation with special laboratory test method [Electronic resource] / E. Juhász, Sz. Fischer // *14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium* (Pécs, 2018, October 29–30). – Pécs, 2018. – Available at: <https://clck.ru/G4KnU> – Title from the screen. – Accessed : 17.05.2019.
22. Khan, S. N. Numerical analysis of deformation and stability in the formation for railway tracks [Electronic resource] : Thesis for Master // S. N. Khan ; Universität Weimar. – Weimar, 2018. – Available at: <https://u.to/95JuFQ> – Title from the screen. – Accessed : 20.05.2019.
23. Köken, E. An experimental investigation on the durability of railway ballast material by magnesium sulfate soundness [Electronic resource] / E. Köken, A. Özarslan, G. Bacak // *Granular Matter*. – 2018. – Vol. 20. – Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10035-018-0804-3> – Title from the screen. – Accessed : 20.05.2019. doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0804-3>
24. Köken, E. New testing methodology for the quantification of rock crushability: Compressive crushing value (CCV) / E. Köken, A. Özarslan // *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. – 2018. – Vol. 25. – Iss. 11. – P. 1227–1236. doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1675-7>
25. Kozma, I. Kerámia gömbhéjakkal erősített fémhab kompozitok szerkezetének CT alapú rekonstrukciója / I. Kozma, G. Dorogi, Sz. Papp // *Anyagok világa*. – 2014. – Vol. XII, No.1. – P. 60–72.
26. Kozma, I. Measurement of the diameter of the imprint based on image processing using MathCAD and the evaluation software of an industrial CT / I. Kozma, E. Halbritter // *Acta Technica Jaurinensis*. – 2013. – Vol. 6, No. 2. – P. 45–58.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

27. Laboratory fatigue degradation tests of railway ballast materials [Electronic resource] / Sz. Fischer, A. Németh, D. Harrach, E. Juhász // 22nd International Conference on Civil Engineering and Architecture, EPKO 2018 (Sumuleu Ciuc (Csíksomlyó) 8 May–3 June 2018). – Sumuleu Ciuc, 2018. – Available at: <https://clck.ru/G46U7> – Title from the screen. – Accessed : 17.05.2019.
28. Lichtberger, B. Track compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics / B. Lichtberger. – Hamburg : Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co, 2005. – 634 p.
29. MÁV. «A 102345/1995 PHMSZ előírás 3. számú módosítása» (Modification 3 in MÁV 102345/1995 PHMSZ. Railway substructure and ballast quality acceptance regulations instruction). – Budapest, 2008. – 5 p.
30. MÁV. «A 102345/1995 PHMSZ előírás 4. számú módosítása». (Modification 4 in MÁV 102345/1995 PHMSZ. Railway substructure and ballast quality acceptance regulations instruction). – Budapest, 2010. – 14 p.
31. Migration of fine particles from subgrade soil to the overlying ballast [Electronic resource] / R. S. Kamalov, G. S. Ghataora, M. P. N. Burrow, M. Wehbi, P. Musgrave // Railway Engineering Conference (Edinburgh 2017, June 21–22). – Edinburgh, 2017. – Available at: <https://u.to/j6dpFQ> – Title from the screen. – Accessed : 17.05.2019.
32. Morphological Characterization of Railroad Ballast Degradation Trends in the Field and Laboratory / M. Moaveni, Y. Qian, I. I. A. Qamhia, E. Tutumluer, C. Basye, D. Li // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2016. – Vol. 2545. – Iss. 1. – P. 89–99. doi: <https://doi.org/10.3141/2545-10>
33. MSZ EN 1097-1:2012. «Kőanyaghalmozatok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 1. rész: A kopásállóság vizsgálata (mikro-Deval)». (Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the resistance to wear (micro-Deval)). – Budapest, 2012. – 35 p.
34. MSZ EN 1097-2:2010. «Kőanyaghalmozatok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 2. rész: Az aprózódással szembeni ellenállás meghatározása». (Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Methods for the determination of resistance to fragmentation). – Budapest, 2010. – 35 p.
35. MSZ EN 933-3: Kőanyaghalmozatok geometriai tulajdonságainak vizsgálata. 3. rész: A szemalak meghatározása. Lemezzességi szám. – Budapest, 2012. – 12 p.
36. MSZ EN 1367-2: Kőanyaghalmozatok termikus tulajdonságainak és időjárás-állóságának vizsgálati módszerei. 2. rész: Magnézium-szulfátos eljárás. – Budapest, 2010. – 16 p.
37. MSZ EN 13450:2003. «Kőanyaghalmozatok vasúti ágyazathoz». (Aggregates for railway ballast). – Budapest, 2003. – 33 p.
38. Nagy, R. Analytical differences between seven prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods / R. Nagy // Intersections. – 2017. – Vol. 14, No. 1. – P. 14–32.
39. Nagy, R. Analytical differences between six prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods / R. Nagy // Computational Civil Engineering 2017 : International Symposium (Iasi, Romania, May 26, 2017). – Iasi, 2017. – P. 31–50.
40. Nagy, R. A vasúti pályageometria romlási folyamatának leírása / R. Nagy // Sínek világa. – 2016. – Vol. 58, No. 6. – P. 12–18.
41. Nagy, R. Description of rail track geometry deterioration process in Hungarian rail lines No. 1 and No. 140 / R. Nagy // Pollack Periodica. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 3. – P. 141–156. doi: <https://doi.org/10.1556/606.2017.12.3.13>
42. Nie, Z. A three-dimensional particle roundness evaluation method [Electronic resource] / Z. Nie, Z. Liang, X. Wang // Granular Matter. – 2018. – Vol. 20. – Iss. 2. – Available at: <https://u.to/WeVuFQ> – Title from the screen. – Accessed : 20.05.2019. doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0802-5>
43. Nimbalkar, S. Field assessment of ballasted rail-roads using geosynthetics and shock mats / S. Nimbalkar, B. Indraratna // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 143. – P. 1485–1494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.175>
44. Orosz, Á. Calibration of railway ballast DEM model / Á. Orosz, K. Tamás, J. P. Rádics // 31st European Conference on Modelling and Simulation, EMCS 2017 (May 23rd–May 26th, 2017, Budapest, Hungary). – Budapest, 2017. doi: <https://doi.org/10.7148/2017-0523>
45. Orosz, Á. The feasibility of modelling rocks in engineering applications with the use of discrete element method / Á. Orosz, K. Tamás, J. P. Rádics // Hungarian Agricultural Engineering. – 2017. – Iss. 32. – P. 51–55. doi: <https://doi.org/10.17676/HAE.2017.32.51>

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

46. Paiva, C. E. L. Study of Railway Ballast Fouling by Abrasion-Originated Particles / Cassio E. L. de Paiva, Mauro L. Pereira, Lia L. Pimentel // *Railway Engineering* – 2017 : Proc. of the 14th Intern. Conf. (Edinburgh, Scotland, UK, 21st–22nd June 2017). – Edinburgh, 2017.
47. Sadeghi, J. M. Developing Track Ballast Characteristic Guideline in Order to Evaluate its Performanc / J. M. Sadeghi, J. Ali Zakeri, M. Emad Motieyan Najar // *International Journal of Railway*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 27–35. doi: <https://doi.org/10.7782/IJR.2016.9.2.027>
48. Sun, Y. Identification of ballast grading for rail track / Y. Sun, C. Chen, S. Nimbalkar // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 5. – P. 945–954. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.04.006>
49. Track ballast in Austria : Parts 1, 2, 3 [Electronic resource] // *Rail Infrastructure*. – Available at: https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user_upload/Mediathek/Publikationen/ri_12888990.pdf – Title from the screen. – Accessed : 11.05.2019.
50. Sysyn, M. P. Performance study of the inertial monitoring method for railway turnouts / M. P. Sysyn, V. V. Kovalchuk, D. Jiang // *International Journal of Rail Transportation*. – 2018. – Vol. 4. – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1514282>
51. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works / M. Sysyn, U. Gerber, V. Kovalchuk, O. Nabochenko // *Archives of Transport*. – 2018. – Vol. 46. – Iss. 3. – P. 91–107. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6512>
52. Theoretical study into efficiency of the improved longitudinal profile of frogs at railroad switches / V. Kovalchuk, M. Sysyn, J. Sobolevska, O. Nabochenko, B. Parneta, A. Pentsak // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 4, No. 1. – P. 27–36. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139502>

Є. ЮХАС^{1*}, С. ФІШЕР^{2*}

^{1*}Каф. «Інфраструктура транспорту й гідротехніка», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Дьєр, Угорщина, 9026, тел. +36 (96) 613 544, ел. пошта juhasz.erika@sze.hu, ORCID 0000-0002-5544-3146

^{2*}Каф. «Інфраструктура транспорту й гідротехніка», Університет Іштвана Сечені, пл. Університетська, 1, Дьєр, Угорщина, 9026, тел. +36 (96) 613 544, ел. пошта fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ РУЙНУВАННЯ ЧАСТОК ЗАЛІЗНИЧНОГО БАЛАСТУ

Мета. Більшість залізничних ліній у світі мають так звану традиційну верхню будову колії з баластним шаром. На думку авторів, для гарантування безпеки руху важливо вивчити процес руйнування баластного шару. У ЄС існує тільки два типи стандартних методів лабораторних випробувань для оцінки ступеня руйнування часток залізничного баластного шару й описання їх фізичних характеристик. Але вони не придатні для моделювання напружено-деформованого стану залізничних баластних матеріалів і їх часток. У цій статті автори представляють методи випробувань, за допомогою яких процес руйнування залізничних часток баласту можна оцінити більш реалістично й точно. Ці методи базуються на висновках із досліджень, індивідуальних лабораторних випробувань на втому, а також із додаткових випробувань. **Методика.** У роботі подано два типи лабораторних випробувань. Перший був виконаний із використанням зсувної коробки зі спеціальною шаруватою структурою, яка навантажена динамічною, пульсуючою силою. Другий тип – із використанням труби з поліетилену високої щільності діаметром 140 мм з оригінальною запірною деталлю, навантаженою машиною ZD–40. **Результати.** Після науково-дослідних розробок, проведених і опублікованих у 2014 році, спостерігається розвиток методів оцінки руйнування баластного шару. У 2017 й 2018 роках під час випробувань руйнування часток баласту було здійснено з більшими проміжними циклами втоми та окремими вимірами, які більш точно показують повне руйнування часток, тобто процес руйнування. Проведено кореляцію між розрахунковими параметрами й циклами навантаження на втому. Однак під час випробування залишається багато факторів, які потребують поліпшення. Тому автори описують інші додаткові тести. **Наукова новизна.** У роботі запропонована вдосконалена методика оцінки руйнування баластного шару залізничної колії, яка дає більш точні результати порівняно з традиційними методами вимірювань.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Практична значимість. Методи, розроблені авторами можуть служити основою для складання нових інструкцій або правил. Публікація цієї статті була підтримана проектом EFOP 3.6.1-16-2016-00017.

Ключові слова: авторський лабораторний метод випробувань; залізничний баласт; руйнування часток; випробування на динамічну втому; випробування на статичний тиск; КТ-обладнання; аналіз тривимірного зображення

Е. ЮХАС^{1*}, С. ФИШЕР^{2*}

^{1*}Каф. «Інфраструктура транспорту», Університет Іштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. + 36 (96) 613 544, ел. почта juhasz.erika@sze.hu, ORCID 0000-0002-5544-3146

^{2*}Каф. «Інфраструктура транспорту», Університет Іштвана Сечени, пл. Университетская, 1, Дьер, Венгрия, 9026, тел. + 36 (96) 613 544, ел. почта fischersz@sze.hu, ORCID 0000-0001-7298-9960

УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО БАЛЛАСТА

Цель. Большинство железнодорожных линий в мире имеют так называемое традиционное верхнее строение пути с балластным слоем. По мнению авторов, для обеспечения безопасности движения важно изучить процесс разрушения балластного слоя. В ЕС существует только два типа стандартных методов лабораторных испытаний для оценки степени разрушения частиц железнодорожного балластного слоя и описания физических характеристик горных пород. Но они не пригодны для моделирования напряженно-деформированного состояния железнодорожных балластных материалов и их частиц. В данной статье авторы представляют методы испытаний, с помощью которых процесс разрушения железнодорожных частиц балласта можно оценить более реалистично и точно. Эти методы базируются на выводах из исследований авторов, индивидуальных лабораторных испытаний на усталость, а также из дополнительных испытаний. **Методика.** В работе представлены два типа лабораторных испытаний. Первый был выполнен с использованием сдвиговой коробки со специальной слоистой структурой, которая нагружена динамической, пульсирующей силой. Второй тип – с использованием трубы из полиэтилена высокой плотности диаметром 140 мм с оригинальной запирающей деталью, нагруженной машиной ZD–40. **Результаты.** После научно-исследовательских разработок, проведенных и опубликованных в 2014 году, наблюдается развитие методов оценки разрушения балластного слоя. В 2017 и 2018 годах во время испытаний разрушение балластных частиц было осуществлено с большими промежуточными циклами усталости с отдельными измерениями, которые более точно показывают полное разрушение частиц, т. е. процесс разрушения. Произведена корреляция между расчетными параметрами и циклами нагрузки на усталость. Однако во время испытаний остается много факторов, требующих улучшения. Поэтому авторы описывают другие дополнительные тесты. **Научная новизна.** В работе предложена усовершенствованная методика оценки разрушения балластного слоя железнодорожного пути, которая дает более точные результаты по сравнению с традиционными методами измерений. **Практическая значимость.** Методы, разработанные авторами, могут служить основой для составления новых инструкций или правил. Публикация данной статьи была поддержана проектом EFOP 3.6.1-16-2016-00017.

Ключевые слова: авторский лабораторный метод испытаний; железнодорожный балласт; разрушение частиц; испытание на динамическую усталость; испытание на статическое давление; КТ-оборудование; анализ трехмерного изображения

REFERENCES

1. Kurhan, D. M. (2015). To the solution of problems about the railways calculation for strength taking into account unequal elasticity of the subrail base. *Science and Transport Progress*, 1(55), 90-99. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2015/38250> (in Ukrainian)
2. Ágh, Cs. (2018). A new arrangement of accelerometers on track inspection car FMK-007 for evaluating derailment safety, *Track Maintenance Machines in Theory and Practice, SETRAS 2018*. Žilina. (in English)
3. Ágh, Cs. (2012). Egyenértékű küpesség mérés Magyarországon: Pálya és jármű kapcsolata – futási instabilitás. *Sínek világa*, 54(6), 10-13. (in Hungarian)
4. Ágh, Cs. (2018). Vágánygeometriai irány- és fekszinthibák valós nagyságának értékelése húrmérési eredmények alapján. *Közlekedéstudományi szemle*, 68(5), 46-55. (in Hungarian)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

5. Ágh, Cs. (2017). Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből. *Sínek világa*, 59(6), 17-20. (in Hungarian)
6. Al-Saoudi, N. K. S., & Hassan, K. H. (2013). Behaviour of Track Ballast under Repeated Loading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(1), 167-178. doi: <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9701-z> (in English)
7. Kozma, I., Zsoldos, I., Dorogi, G., & Papp, S. (2015). Application of Computed Tomography in Structure Analyses of Metal Matrix Syntactic Foams. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 7(5), 379-382. doi: <https://doi.org/10.7763/ijcte.2015.v7.989> (in English)
8. Arangie, P. B. D. (1997). *The influence of ballast fouling on the resilient behaviour of the ballast pavement layer*, 6th International Heavy Haul Railway Conference, IHHA 1997. Cape Town, South Africa. (in English)
9. Claisse, P., & Calla, C. (2006). Rail ballast: conclusions from a historical perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 159(2), 69-74. doi: <https://doi.org/10.1680/tran.2006.159.2.69> (in English)
10. Kozma, I., Zsoldos, I., Dorogi, G., & Papp, S. (2014). Computer tomography based reconstruction of metal matrix syntactic foams. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 58(2), 87-91. doi: <https://doi.org/10.3311/ppme.7337> (in English)
11. Kozma, I., Zsoldos, I., Dorogi, G., & Papp, S. (2016). Ct-Based Reconstruction of Metal Foam Composite Material Reinforced with Ceramic Spherical Shell Structure. *International Journal of Materials Engineering and Technology*, 15(2-3), 93-107. doi: <https://doi.org/10.17654/mt015230093> (in English)
12. Orosz, A., Tamas, K., Radics, J. P., & Zwierczyk, P. T. (2018). *Coupling Finite and Discrete Element Methods Using an Open Source and a Commercial Software*, 32nd European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2018. Wilhelmshaven. doi: <https://doi.org/10.7148/2018-0399> (in English)
13. TL DBS 918 061: Technische Lieferbedingungen Gleisschotter. TL DBS 918 061: Technical delivery conditions Railway ballast. (2006). Berlin, 2006/08. (in German)
14. Douglas, S. C. (2013). *Ballast Quality and Breakdown during Transport*, 2013 Joint Rail Conference. Knoxville, Tennessee, USA. doi: <https://doi.org/10.1115/JRC2013-2553> (in English)
15. Huang, H., Moaveni, M., Schmidt, S., Tutumluer, E., & Hart, J. M. (2018). Evaluation of Railway Ballast Permeability Using Machine Vision-Based Degradation Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(10), 62-73. doi: <https://doi.org/10.1177/0361198118790849> (in English)
16. Fischer, S. (2017). Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(4), 794-802. doi: <https://doi.org/10.3311/ppci.8549> (in English)
17. Fischer, Sz. (2015). Crumbling examination of railway crushed stones by individual laboratory method. *Sínek Világa*, 57(3), 12-19. (in Hungarian)
18. Fischer, Sz., & Németh, A. (2018). *Individual rock physics investigations of railway ballast materials*. *Kő-és Kavicsbányász Napok 2018: XI Conference*. Velence. Retrieved from <https://u.to/YmyyFQ> (in Hungarian)
19. Fischer, Sz., & Németh, A. (2018). *Special laboratory test for evaluation breakage (particle degradation) of railway ballast*, *Conference on Transport Sciences*. Győr. Retrieved from <https://u.to/84dpFQ> (in English)
20. Juhász, E., & Fischer, Sz. (2019). *Individual laboratory test method for railroad ballast particle breakage*, *Conference on Transport Sciences*. Győr. Retrieved from <https://u.to/H49pFQ> (in English)
21. Juhász, E., & Fischer, Sz. (2018). *Investigation of railway ballast materials' particle degradation with special laboratory test method*, *14th Miklós Iványi PhD & DLA Symposium*. Pécs. Retrieved from <https://clck.ru/G4KnU> (in English)
22. Khan, S. N. (2018). Numerical analysis of deformation and stability in the formation for railway tracks. (Thesis for Master). Universität Weimar, Weimar. Retrieved from <https://u.to/95JuFQ> (in English)
23. Köken, E., Özarslan, A., & Bacak, G. (2018). An experimental investigation on the durability of railway ballast material by magnesium sulfate soundness. *Granular Matter*, 20(2). doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0804-3> (in English)
24. Köken, E., & Özarslan, A. (2018). New testing methodology for the quantification of rock crushability: Compressive crushing value (CCV). *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25(11), 1227-1236. doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1675-7> (in English)
25. Kozma, I., Dorogi, G., & Papp, Sz. (2014). Kerámia gömbhéjakkal erősített fémhab kompozitok szerkezetének CT alapú rekonstrukciója. *Anyagok világa*, XII(1), 60-72. (in Hungarian)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

26. Kozma, I., & Halbritter, E. (2013). Measurement of the diameter of the imprint based on image processing using MathCAD and the avaluation software of an industrial CT. *Acta Technica Jaurinensis*, 6(2), 45-58. (in English)
27. Fischer, Sz., Németh, A., Harrach, D., & Juhász, E. (2018). *Laboratory fatigue degradation tests of railway ballast materials, 22nd International Conference on Civil Engineering and Architecture, EPKO 2018*. Summuleu Ciuc. Retrieved from <https://clck.ru/G46U7> (in Hungarian)
28. Lichtberger, B. (2005). *Track compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*. Hamburg: Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. (in English)
29. A 102345/1995 PHMSZ előírás 3. számú módosítása (Modification 3 in MÁV 102345/1995 PHMSZ. 'Railway substructure and ballast quality acceptance regulations instruction'), MÁV (2008). (in Hungarian)
30. A 102345/1995 PHMSZ előírás 4. számú módosítása. (Modification 4 in MÁV 102345/1995 PHMSZ. 'Railway substructure and ballast quality acceptance regulations instruction'), MÁV (2010). (in Hungarian)
31. Kamalov, R. S., Ghataora, G. S., Burrow, M. P. N., Wehbi, M., & Musgrave, P. (2017). *Migration of fine particles from subgrade soil to the overlying ballast, Railway Engineering Conference*. Edinburgh. Retrieved from <https://u.to/j6dpFQ> (in English)
32. Moaveni, M., Qian, Y., Qamhia, I. I. A., Tutumluer, E., Basye, C., & Li, D. (2016). Morphological Characterization of Railroad Ballast Degradation Trends in the Field and Laboratory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2545(1), 89-99. doi: <https://doi.org/10.3141/2545-10> (in English)
33. Kőanyaghalmozok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 1. rész: A kopásállóság vizsgálata (mikro-Deval). (Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the resistance to wear (micro-Deval), MSZ EN 1097-1:2012 (2012). (in Hungarian)
34. Kőanyaghalmozok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 2. rész: Az aprózódással szembeni ellenállás meghatározása. (Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Methods for the determination of resistance to fragmentation), MSZ EN 1097-2:2010 (2010). (in Hungarian)
35. Kőanyaghalmozok geometriai tulajdonságainak vizsgálata. 3. rész: A szemalak meghatározása. Lemezességi szám. MSZ EN 933-3 (2012). (in Hungarian)
36. Kőanyaghalmozok termikus tulajdonságainak és időjárás-állóságának vizsgálati módszerei. 2. rész: Magnézium-szulfátos eljárás. MSZ EN 1367-2 (2010). (in Hungarian)
37. Kőanyaghalmozok vasúti ágyazathoz. (Aggregates for railway ballast). MSZ EN 13450:2003 (2003). (in Hungarian)
38. Nagy, R. (2017). Analytical differences between seven prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods. *Intersections*, 14(1), 14-32. (in English)
39. Nagy, R. (2017). *Analytical differences between six prediction models and the description of the rail track deterioration process through these methods, Computational Civil Engineering 2017, International Symposium*. Iasi. (in English)
40. Nagy, R. (2016). A vasúti pályageometria romlási folyamatának leírása. *Sínek világa*, 58(6), 12-18. (in Hungarian)
41. Nagy, R. (2017). Description of rail track geometry deterioration process in Hungarian rail lines No. 1 and No. 140. *Pollack Periodica*, 12(3), 141-156. doi: <https://doi.org/10.1556/606.2017.12.3.13> (in English)
42. Nie, Z., Liang, Z., & Wang, X. (2018). A three-dimensional particle roundness evaluation method. *Granular Matter*, 20(2). doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0802-5> (in English)
43. Nimbalkar, S., & Indraratna, B. (2016). Field Assessment of Ballasted Railroads Using Geosynthetics and Shock Mats. *Procedia Engineering*, 143, 1485-1494. Retrieved from <https://u.to/WeVuFQ> doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.175> (in English)
44. Orosz, A., Radics, J. P., & Tamas, K. (2017). *Calibration of Railway Ballast DEM Model, 31st European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2017*. Budapest. doi: <https://doi.org/10.7148/2017-0523> (in English)
45. Orosz, Á., Tamás, K., & Rádics, J. P. (2017). The feasibility of modelling rocks in engineering applications with the use of discrete element method. *Hungarian Agricultural Engineering*, 32, 51-55. doi: <https://doi.org/10.17676/hae.2017.32.51> (in English)
46. Paiva, C. E. L., Pereira, M. L., & Pimentel, L. L. (2017). *Study of Railway Ballast Fouling by Abrasion Originated Particles, Railway Engineering – 2017*. Edinburgh. (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

47. Sadeghi, J. M., Zakeri, J. Ali, & Najari, M. E. M. (2016). Developing Track Ballast Characteristic Guideline in Order to Evaluate its Performanc. *International Journal of Railway*, 9(2), 27-35. doi: <https://doi.org/10.7782/IJR.2016.9.2.027> (in English)
48. Sun, Y., Chen, C., & Nimbalkar, S. (2017). Identification of ballast grading for rail track. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(5), 945-954. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.04.006> (in English)
49. Track ballast in Austria: Parts 1, 2, 3. *Rail Infrastructure*. Retrieved from https://www.plassertheurer.com/fileadmin/user_upload/Mediathek/Publikationen/ri_12888990.pdf (in English)
50. Sysyn, M. P., Kovalchuk, V. V., & Jiang, D. (2018). Performance study of the inertial monitoring method for railway turnouts. *International Journal of Rail Transportation*, 4, 33-42. doi: <https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1514282> (in English)
51. Sysyn, M., Gerber, U., Kovalchuk, V., & Nabochenko, O. (2018). The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works. *Archives of Transport*, 47(3), 91-107. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6512> (in English)
52. Kovalchuk, V., Sysyn, M., Sobolevska, J., Nabochenko, O., Parneta, B., & Pentsak, A. (2018). Theoretical study into efficiency of the improved longitudinal profile of frogs at railroad switches. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/1(94), 27-36. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139502> (in English)

Received: Jan. 21, 2019

Accepted: May 15, 2019

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.875.5:624.014-047.58

Ю. Г. САГІРОВ^{1*}, В. В. СУГЛОБОВ²

^{1*}Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (096) 307 93 14, ел. пошта sagirov1978@ukr.net, ORCID 0000-0002-8854-0639

²Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, ел. пошта suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТА АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ПОРТАЛУ КРАНА

Мета. За основну мету цієї роботи ми ставимо моделювання навантаженості порталу під час роботи крана «Азовець», аналіз фактичного напружено-деформованого стану елементів металоконструкції порталу. Об'єктом дослідження є закономірність розподілу напружень в елементах порталу. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використані методи: аналітичних інженерних розрахунків, імітаційного моделювання, скінченних елементів, візуально-оптичний метод під час обстеження стану металоконструкції крана. **Результати.** Із використанням CAD/CAE-системи було змодельовано навантажений стан металоконструкції портального крана та виконано розрахунок її на міцність методом скінченних елементів. Наведено результати розрахунків та аналізу напружено-деформованого стану. Отримана закономірність розподілу напружень в елементах колони наочно показала, що напруження розподілені нерівномірно; напружено-деформований стан елементів порталу є досить складним, нерівномірним і потребує модернізації. **Наукова новизна.** Отримали подальший розвиток наявні методи проектування металоконструкцій портальних кранів. Уперше запропоновано методику проектування раціональних металоконструкцій за критеріями рівномірності розподілу напружень та плавності силового потоку, які також уперше отримали наукове обґрунтування. Уперше розроблені твердотільні моделі металоконструкції портального крана, які дозволяють визначати закономірність розподілу напружень/навантажень і плавності силового потоку в них. **Практична значимість.** Розроблено та впроваджено просторову твердотільну комп'ютерну модель порталу крана «Азовець». Запропоновано методику міцнісного аналізу та раціонального проектування металоконструкції портальних кранів. Подано науково обґрунтовані рекомендації з ремонту й посилення елементів порталу крана «Азовець». Результати теоретичних і практичних досліджень можуть бути використані для викладання навчальних курсів «Проектування металевих конструкцій підйомно-транспортних машин», «Основи автоматизованого проектування машин», «Автоматизоване проектування ПТМ», «Ремонт, монтаж і змашення ПТМ». Наприклад, дані результати використовують у ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

Ключові слова: металоконструкція; портальний кран; моделювання; навантаженість; метод скінченних елементів; синтез; оптимізація

Вступ

Під час експлуатації вантажопідіймальних машин (ВПМ), у тому числі й портальних кранів, досить часто виникають дефекти несних металоконструкцій: тріщини у місцях з'єднань

елементів і кріплення ребер жорсткості біля зварних швів, тріщини в основному металі, розшарування кромок основного металу та ін. Причому вони можуть з'являтися і в досить нових (3–5 років експлуатації) машинах. Причин таких явищ, дослідити які можна завдяки детальному аналізу напружено-деформованого

МАШИНОБУДУВАННЯ

стану, може бути багато (не завжди вдалі рішення під час проектування; умови експлуатації). У кожному окремому випадку причина одна або їх кілька. Виникає необхідність проведення ремонтів, що не завжди ефективно, оскільки дефекти виникають повторно. Підвищення експлуатаційної надійності підйомно-транспортних машин (ПТМ) шляхом уточнення наявних і розробки нових методик розрахунку їхніх металевих конструкцій є актуальним науково-технічним завданням.

На нашу думку, як заходи з ремонту, так і прийняття конструктивних рішень під час проектування (визначення геометричних параметрів) повинні ґрунтуватись на якісному аналізі напружено-деформованого стану металоконструкції та її елементів, розрахунках на міцність. На сьогодні це є можливим завдяки застосуванню методу скінченних елементів, сучасних персональних комп'ютерів і відповідних систем CAD/CAE.

Раніше в роботі [2] виконаний аналіз наявних методів проектування й оптимізації металевих конструкцій, у тому числі металевих конструкцій ВПМ. Цей метод набуває все більшого застосування. Традиційні розрахунки кранових металоконструкцій на міцність, які застосовуються у переважній більшості, засновані на припущенні плоскої схеми їх роботи, тоді як їх елементи працюють як просторові системи. Однак, на даний час поступово зникає необхідність в розбивці на плоскі елементи і взагалі в розрахунку ізольованих великих вузлів металоконструкцій.

Разом із тим відсутні методики, які б пропитували послідовність розробки моделей, прийняття розрахункових схем, вимоги до розрахунків і до отриманих результатів під час проектування металоконструкцій ПТМ із застосуванням методу скінченних елементів і використанням CAD/CAE-систем. Перспективним є напрямок використання елементів методу топологічної оптимізації під час проектування металевих конструкцій, який є досить розповсюдженим [2, 3, 5–7].

Мета

За основну мету цієї роботи ми ставимо моделювання навантаженості порталу під час роботи крана «Азовець» (рис. 1) та аналіз факти-

чного напружено-деформованого стану елементів його металоконструкції.

Об'єктом дослідження є закономірність розподілу напружень в елементах порталу.

a – a



б – б



Рис. 1. Кран портальний «Азовець»: *a* – загальний вигляд; *б* – портал та колона

Fig. 1. Port Azov Crane: *a* – general view; *b* – gantry and pillar

Методика

У роботі [3] для визначення навантаженого стану, з урахуванням рекомендацій і даних [4], була розроблена розрахункова схема (рис. 2) на підставі геометричних параметрів

МАШИНОБУДУВАННЯ

крана і діючих навантажень. Запропонована методика розрахунку й оптимізації (підсилення) металоконструкції порталного крана з використанням сучасного інструментарію, розроблена просторова твердотільно-деформована модель порталу крана «Азовець», згенерована сітка скінченних елементів. Також у [3] була запропонована розрахункова схема й визначені навантаження, що діють на металеву конструкцію, виконаний аналіз напружено-деформованого стану металоконструкції колони. Місця прикладання сил та їх напрямки збережені для розв'язання цього завдання.

Для фактичного й подальшого аналізу напружено-деформованого стану металоконструкції порталу крана виконано уточнений розрахунок методом скінченних елементів.

Розрахункові навантаження і їх комбінації взяті відповідно до норм розрахунку металоконструкцій порталних кранів [4]. Розрахунковий випадок II з визначення міцності металевих конструкцій враховує максимальне (граничне) робоче навантаження, яке включає, окрім навантажень від власної та номінальної ваги вантажу й вантажозахоплювального пристрою, також і максимальні динамічні навантаження, що виникають під час різких пусків і екстреного гальмування механізмів, раптового ввімкнення (вимкнення) електричного струму, і граничні значення вітрового навантаження робочого стану.

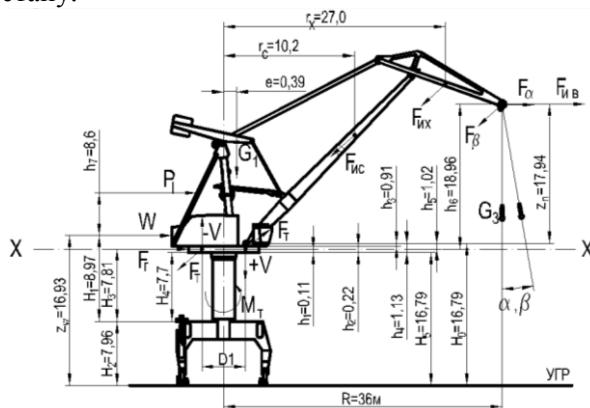


Рис. 2. Розрахункова схема [3]

Fig. 2. Calculation scheme [3]

Зусилля було розраховано за двох варіантів навантаження.

Варіант I: працює тільки механізм підйому, комбінація навантажень II а:

- 1) вага вантажу – G ;
- 2) коефіцієнт динамічності – ψ_{II} ;
- 3) кут косоного підйому – $\alpha_{під}$.

Варіант II: працюють механізми зміни вильоту й повороту.

Комбінація навантажень II в:

- 1) вага вантажу – G ;
- 2) кути відхилення канатів від вертикалі – α_{II} , β_{II} (у площині гойдання стріли й перпендикулярно до площини гойдання стріли відповідно);
- 3) сили інерції дотичні стріли і хобота під час повороту крана – $0,5 \cdot F_{ic}$, $0,5 \cdot F_{ix}$ відповідно;
- 4) сили інерції під час зміни вильоту – $0,5 \cdot F_{iv}$;
- 5) сила вітру робочого стану – P_I .

Результати

Метод скінченних елементів реалізовано в CAD/CAE-системі. Згідно з кресленням була розроблена комп'ютерна 3D-модель зі збереженням геометричних параметрів (рис. 3) [3]. Після перевірки моделі на адекватність було прийнято рішення: як опори порталу застосувати шарнірне закріплення, для чого були змодельовані відповідні елементи (рис. 4). Таке рішення дозволило імітувати процес можливого провороту ходового колеса відносно рейки в результаті деформації металоконструкції порталу, що більшою мірою відповідає поведінці реального об'єкта.

Після розробки моделі була згенерована сітка скінченних елементів. Розмір мінімального стрижня взято меншим за мінімальний геометричний розмір у моделі.

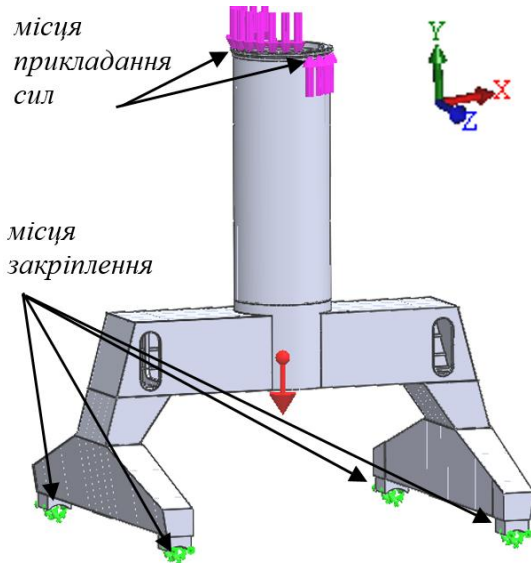
У результаті моделювання напружено-деформованого стану були отримані епюри розподілу еквівалентних напружень у моделі, епюри нормальних напружень у трьох площинах, епюра розподілу коефіцієнта запасу міцності, епюра направленості силових потоків, епюра розподілу еквівалентних напружень (von Mises) із застосуванням обмеження ISO для двох варіантів навантажень.

Попередній аналіз напружено-деформованого стану порталу за першим і другим варіантом навантаження показав, що найбільш несприятливим (більші значення напру-

МАШИНОБУДУВАННЯ

жень) є перший варіант. Загальний вигляд епюри розподілу еквівалентних напружень наведено на рис. 5. Модель представлена у деформованому вигляді – для більшої наочності всі деформації збільшено у 30 разів. Розглянемо її більш детально.

a – a



б – б

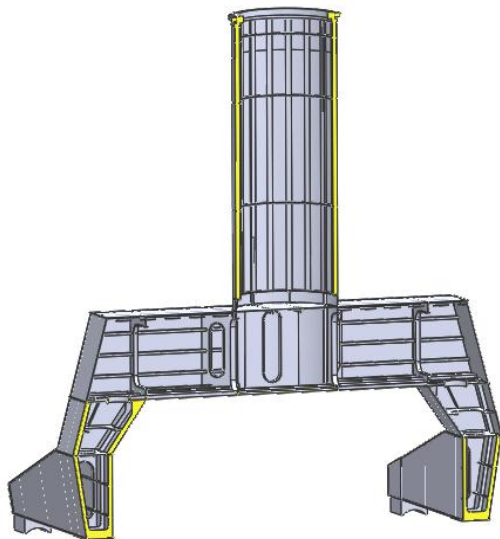


Рис. 3. Модель порталу:
a – загальний вигляд; *б* – переріз

Fig. 3. Gantry model:
a – general view; *b* – section

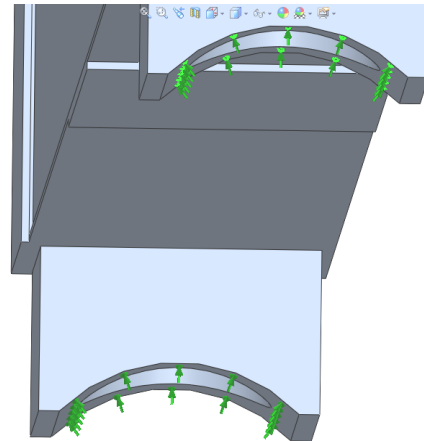


Рис. 4. Місця закріплення моделі (збільшено)

Fig. 4. Places for fixing the model (enlarged)

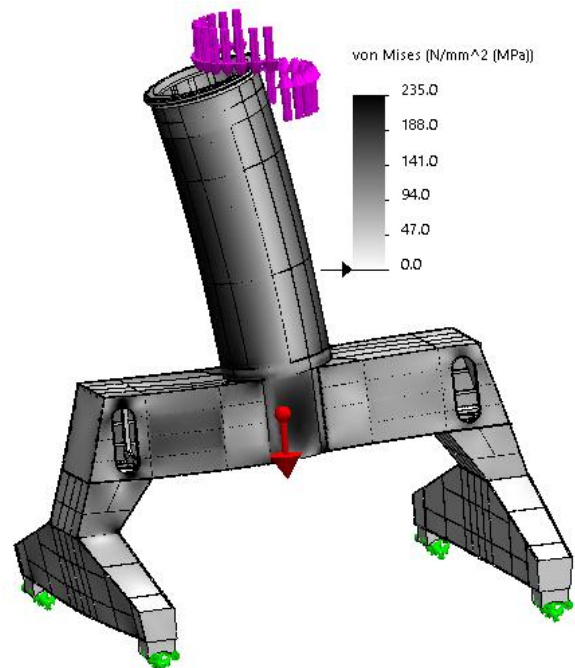


Рис. 5. Загальний вигляд епюри розподілу еквівалентних напружень на деформованій моделі (усі переміщення збільшено в 30 разів)

Fig. 5. General view of the distribution diagram of equivalent stresses on the strained model (all displacements are increased by 30 times)

На епюрі розподілу еквівалентних напружень (рис. 5) світлі ділянки відповідають меншим значенням напружень, темні – більшим значенням. Необхідно виявити місця концентрації напружень, оскільки такі ділянки можуть бути джерелом появи тріщин і руйнувань конструкції. Для більш наочного відображення мак-

МАШИНОБУДУВАННЯ

симально напружених ділянок металокопструкції побудовано епюру із застосуванням інструменту «обмеження ISO», який дає змогу не відображати ділянки (зробити їх прозорими), напруження в яких є меншими за встановлене (граничне) значення. Граничне значення напружень узято 113 МПа. У результаті отримано епюру, яку представлено на рис. 6.

Як видно з епюри (рис. 6), можна виділити наступні елементи, які є найбільш навантаженими:

- 1 – внутрішні кути місця з'єднання опори й балки;
- 2 – зовнішній лист ригеля над і під пройомом для входу;
- 3 – верхній і боковий листи в місцях з'єднання з колоною;
- 4 – кутова діафрагма всередині ригеля;
- 5 – внутрішні кути місця з'єднання балки з балансиром механізму пересування крана.

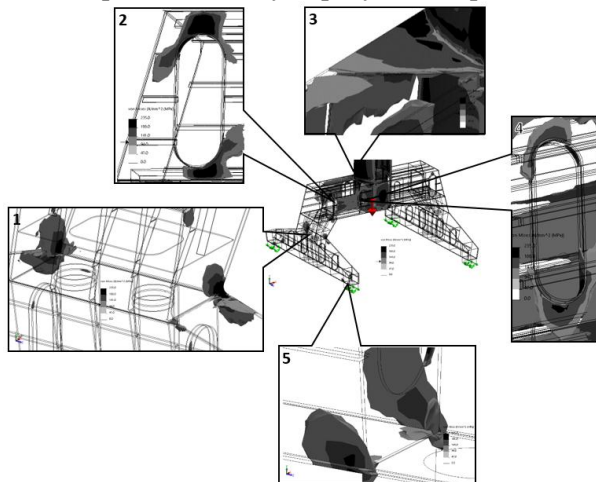


Рис. 6. Відображення найбільш навантажених елементів після застосування обмеження ISO (113 МПа)

Fig. 6. Displaying the most loaded elements after applying the ISO limit (113 MPa)

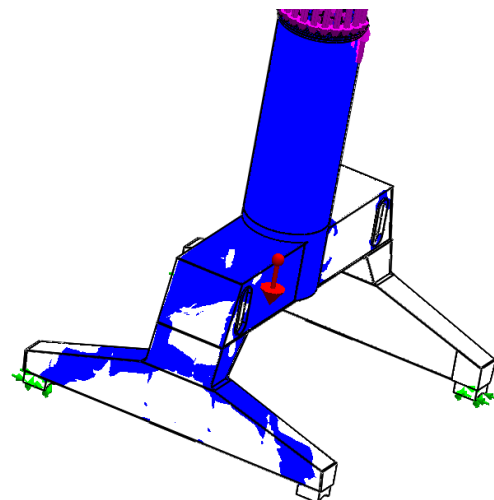
На епюрі направленості силових потоків (рівномірності розподілу напружень) (рис. 7) наочно видно елементи металокопструкції, які більш ефективно (для прийнятої розрахункової схеми) задіяні в передачі сил від місця їхнього прикладання до опорної частини крана. Ділянки, які не задіяні в передачі сил, є прозорими. Як бачимо, досить багато таких елементів

у копструкції балки й опори, що свідчить про не дуже вдалі копструктивні рішення, бо забезпечення плавності силового потоку є важливим принципом копструювання.

Детальний аналіз напружено-деформованого стану із застосуванням наявного інструментарію сучасних CAD/CAE-систем, проведемо на прикладі елемента 1 (рис. 6).

На рис. 8 представлено епюру розподілу еквівалентних напружень von Mises (МПа) у місці з'єднання опори й балки (внутрішній кут).

a – a



б – б

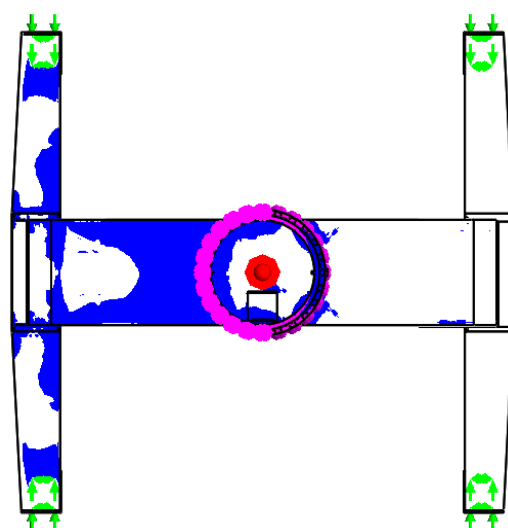


Рис. 7. Епюри направленості силових потоків:
a, б – різні види на копструкцію

Fig. 7. Episodes of direction of power flows:
a, b – different views on the model

МАШИНОБУДУВАННЯ

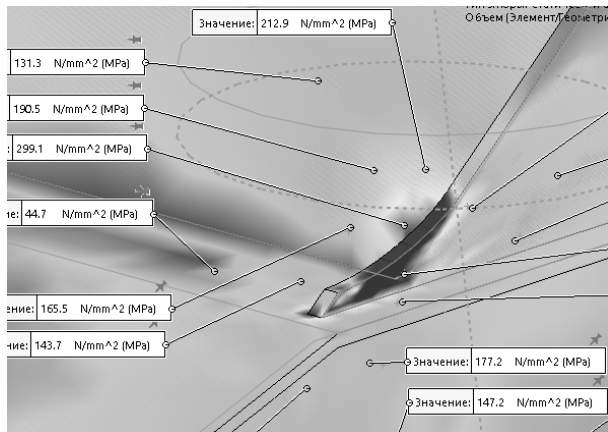


Рис. 8. Значення еквівалентних напружень (МПа) у місці з'єднання опори та балки

Fig. 8. The value of equivalent stresses (MPa) at the point of the connection of the support and beams

Аналіз документації з обстеження метало-конструкції крана показав, що в зазначеному елементі наявні: тріщина поруч зі зварним швом, розшарування основного металу по кро-мці (рис. 9), що цілком відповідає місцю кон-центрації еквівалентних напружень, отримано-му під час моделювання навантаженого стану.

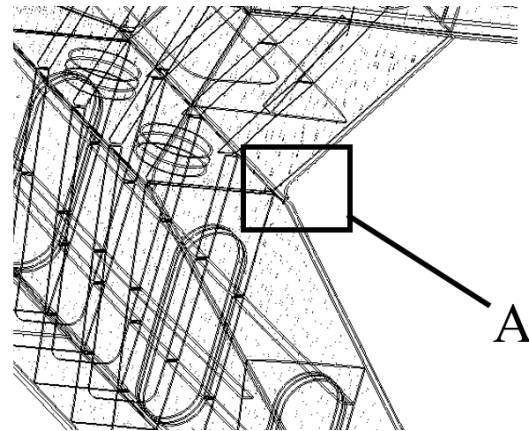


Рис. 9. Фотографія ділянки металоконструкції з виявленими дефектами

Fig. 9. Photo of metal structure section with revealed defects

Якщо розглянути (рис. 10, а) векторну епюру розподілу нормальних напружень (довжина стрілок на векторному представленні епюр пропорційна величині напружень) у вертикальній площині (вісь Y, рис. 3), то можна бачити, що максимальними (214 МПа) є напруження стискування (рис. 10, б). Значення напружень розтягнення сягають 77 МПа.

а – а



б – б

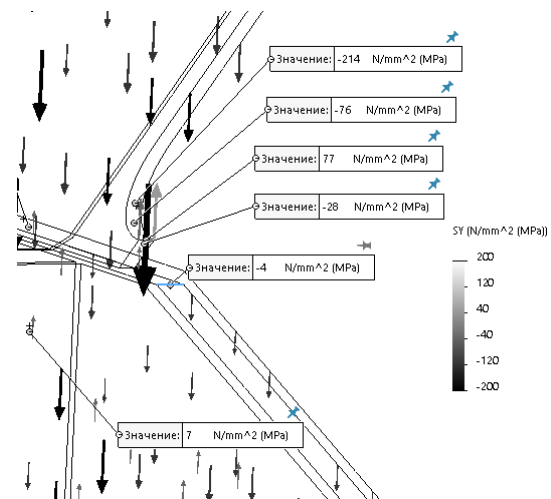


Рис. 10. Загальний вигляд:
а – векторного представлення епюри розподілу нормальних напружень у вертикальній (вісь Y) площині;
б – збільшений вигляд ділянки А – напрям розтягнення↑, напрям стискування↓

Fig. 10. General view:
а – of the vector representation of the distribution diagram of the normal stress in the vertical plane (axis Y); б – the enlarged view of the section A – direction of stretching↑, direction of compression↓

Слід зазначити, що напружено-деформований стан змодельовано для конкретного робочого стану крана, модель є статичною. Цей факт можна віднести до недоліків використаного програмного середовища, бо для отримання напружено-деформованого стану за інших умов (наприклад, інші положення стріли крана відносно рейкової колії) необхідно розробити нову розрахункову модель і повторити розрахунок. Чим більше буде розглянуто можливих варіантів розрахункових схем, тим біль-

МАШИНОБУДУВАННЯ

ше інформації можна отримати про напружений стан елементів металокопструкції під час експлуатації. Не можна відкидати припущення, що під час роботи крана деякі напруження змінюють напрямок на розглядуваній ділянці, що й призводить до розшарування металу на торцевій поверхні листа.

Розглянемо (рис. 11) векторну епію розподілу нормальних напружень у горизонтальній площині (вісь X, рис. 11) для цієї ж ділянки. Видно, що в цій площині також діють різноспрямовані напруження, хоча за рівнем мають дещо менші значення: стискання – 62 МПа, розтягнення – 52 МПа.

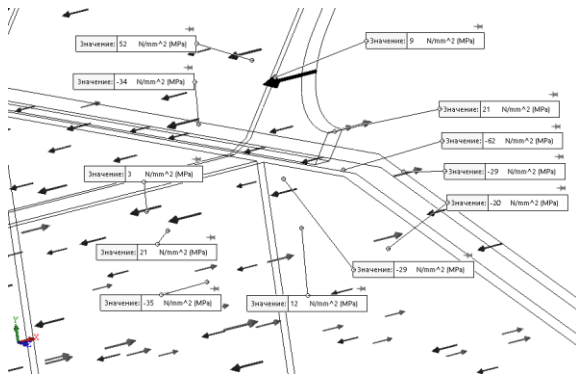


Рис. 11. Збільшений вигляд векторного представлення епію розподілу нормальних напружень у горизонтальній (вісь X) площині (ділянка А, рис. 10) – напруження стискання $\blacktriangleleft$, напруження розтягнення $\blacktriangleright$

Fig. 11. Enlarged view of the vector representation of the distribution diagram of normal stresses in the horizontal plane (X-axis) (section A, Fig. 10) compression stresses $\blacktriangleleft$, tension stresses $\blacktriangleright$

На векторній епію розподілу нормальних напружень у горизонтальній площині (вісь Z, рис. 12) для цієї ж ділянки видно, що переважно діють напруження стискання – 136 МПа.

Проведений аналіз доводить, що напружений стан розглядуваної ділянки є складним, її копструкція недосконала (що також підтверджено практикою експлуатації) та потребує модернізації. У процесі експлуатації крана не можна вносити суттєві зміни в його копструкцію, повною мірою не має змоги використати результати структурного синтезу, що дозволило б перерозподілити матеріал у копструкції, змінити форму елементів та ін.

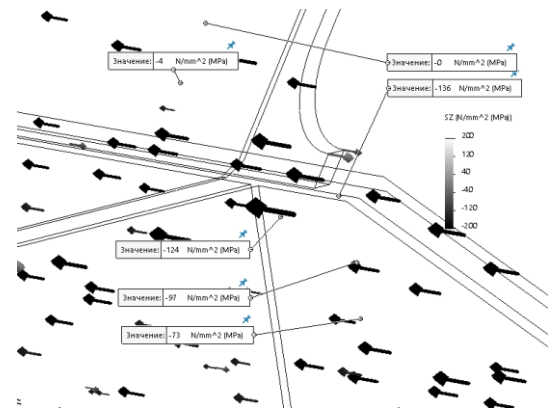


Рис. 12. Збільшений вигляд векторного представлення епію розподілу нормальних напружень у горизонтальній (вісь Z) площині (ділянка А, рис. 10) – напруження стискання $\blacktriangleleft$, напруження розтягнення $\blacktriangleright$

Fig. 12. Enlarged view of the vector representation of the distribution diagram of the normal stresses in the horizontal plane (Z axis) (section A, of Fig. 10) – compression stress $\blacktriangleleft$, tension stress $\blacktriangleright$

Із використанням отриманих результатів за наведеною методикою набагато легше було б внести зміни в копструкцію ще на етапі проектування. Можна було б повною мірою використати результати аналізу напружено-деформованого стану металокопструкції, параметричного й структурного синтезів із метою винайдення оптимальної, із точки зору рівня й рівномірності розподілу напружень, копструкції. Отримані результати, із подальшим параметричним синтезом, дають змогу модернізувати копструкцію та зменшити рівень її напруженості, тим самим підвищити надійність і безпечність експлуатації. Виявлені ділянки з максимальним рівнем напруженості дозволяють більш якісно проводити обстеження під час експлуатації, оскільки саме вони потребують більшої уваги.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі отримали подальший розвиток наявні методи проектування металокопструкцій порталних кранів. Уперше запропоновано методику проектування раціональних металокопструкцій за критеріями рівномірності розподілу напружень і плавності силового потоку, які уперше отримали наукове обґрунтування. Упе-

МАШИНОБУДУВАННЯ

рше розроблені твердотільні моделі металоко-
нструкції порталного крана, які дозволяють ви-
значати закономірність розподілу напру-
жень/навантажень і плавності силового потоку
в них.

Розроблено та впроваджено просторову тве-
рдотільну комп'ютерну модель порталу крана
«Азовець». Запропоновано методику міцнісно-
го аналізу й раціонального проектування мета-
локонструкції порталних кранів. Подано нау-
ково обґрунтовані рекомендації з ремонту
й посиленню елементів порталу крана
«Азовець». Результати теоретичних і практич-
них досліджень використовують у ДВНЗ «При-
азовський державний технічний університет»
під час викладання навчальних курсів «Проек-
тування металевих конструкцій ПТМ», «Осно-
ви автоматизованого проектування машин»,
«Автоматизоване проектування ПТМ», «Ре-
монт, монтаж і змачення ПТМ».

Висновки

Моделювання навантаженого стану пор-
тального крана й детальний аналіз напруженого
стану металококонструкції, виконаний для місця
з'єднання опори й балки, дозволяють ствер-

джувати, що місця концентрації максимальних
напружень збігаються з фактичними місцями
появи дефектів у них. Напружено-
деформований стан елементів вказаної ділянки
є досить складним, оскільки разом із напру-
женнями стискання виникають напруження ро-
зтягнення, які можуть взаємозмінюватися під
час роботи.

Застосування наведеної методики дослі-
дження напружено-деформованого стану ще на
етапі проектування дозволить приймати більш
вдалі, з точки зору забезпечення плавності си-
лового потоку, конструкторські рішення, міні-
мізувати масу конструкції за рахунок перероз-
поділу матеріалу.

Подальший розвиток наведеної методики
дозволить розробляти спрощені моделі для
більш ефективного використання часу, ресурсів
програмного забезпечення й комп'ютера, за-
стосовувати програмне забезпечення, що реалі-
зує методи топологічної оптимізації, а в майбу-
тньому й адитивні технології [5–13] у виготов-
ленні елементів конструкції підйомно-
транспортних машин, приклади чого вже мож-
на бачити в компанії Caterpillar [7].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрощук, Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. – 2017. – № 1. – С. 68–77.
2. Сагіров, Ю. Г. Сучасний стан та перспективи оптимізації проектування металококонструкцій порталних кранів / Ю. Г. Сагіров, В. В. Суглобов, В. В. Кухар // Наука та виробництво : міжвуз. темат. зб. наук. пр. – Маріуполь, 2018. – Вип. 19. – С. 59–68.
3. Сагіров, Ю. Г. Уточненный метод анализа напряженно-деформированного состояния колонны порталного крана / Ю. Г. Сагіров // Передовые научные разработки : Междунар. науч.-техн. конф. (Прага, 27 авг.–05 сент. 2012 г.). – Прага, 2012. – Т. 11 : Технические науки. Технология и спорт. – С. 38–40.
4. Справочник по кранам : в 2 т. / под общ. ред. М. М. Гохберга. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 2 т.
5. Bendsøe, M. P. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications / M. P. Bendsøe, O. Sigmund. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2004. – 370 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6>
6. Boyd, S. Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers / S. Boyd // Foundations and Trends® in Machine Learning. – 2010. – Vol. 3. – Iss. 1. – P. 1–122. doi: <https://doi.org/10.1561/22000000016>
7. Caterpillar opens 3D Printing & Innovation Accelerator at Illinois HQ [Електронний ресурс] / Identify3D. – Режим доступу: <https://identify3d.com/blog/caterpillar-opens-3d-printing-innovation-accelerator-at-illinois-hq/> – Назва з екрана. – Перевірено : 05.06.2019.
8. Deng, S. Multi-constrained topology optimization via the topological sensitivity / S. Deng, K. Suresh // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2015. – Vol. 51. – Iss. 5. – С. 987–1001. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-014-1188-6>
9. Design of shell-infill structures by a multiscale level set topology optimization method / Junjian Fu, Hao Li, Liang Gao, Mi Xiao // Computers & Structures. – 2019. – Vol. 212. – P. 162–172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.10.006>

МАШИНОБУДУВАННЯ

10. Grierson, D. E. Conceptual design optimization of engineering structures / D. E. Grierson, S. Khajepour // Recent advances in optimal structural design / S. A. Burns (Ed.). – Reston, VA : American Society of Civil Engineers, 2002. – P. 81–96.
11. Topology optimization of hierarchical lattice structures with substructuring / Zijun Wu, Liang Xia, Shuting Wang, Tielin Shi // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2018. – Vol. 345. – P. 345–602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.003>
12. Wohlers, T. Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report [Електронний ресурс] / T. Wohlers. – Wohlers Associates, 2014. – 276 p. – Режим доступу: <https://wohlersassociates.com/2014-ExSum.pdf> – Назва з екрана. – Перевірено : 05.06.2019.
13. 5 things every manufacturer needs to know about 3d printing [Електронний ресурс] / Association of Equipment Manufacturers. – Режим доступу: <https://www.aem.org/news/february-2018/5-things-every-manufacturer-needs-to-know-about-3d-printing/> – Назва з екрана. – Перевірено : 05.06.2019.

Ю. Г. САГИРОВ^{1*}, В. В. СУГЛОБОВ²

^{1*}Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (096) 307 93 14, эл. почта sagirov1978@ukr.net, ORCID 0000-0002-8854-0639

²Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, эл. почта suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОРТАЛА КРАНА

Цель. Основной целью данной работы является моделирование нагруженности портала при работе крана «Азовец», анализ фактического напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкции портала. Объектом исследования является закономерность распределения напряжений в элементах портала. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы: аналитических инженерных расчетов, имитационного моделирования, конечных элементов, визуально-оптический метод при обследовании состояния металлоконструкции крана. **Результаты.** С использованием CAD/CAE-системы было смоделировано нагруженное состояние металлоконструкции порталного крана и выполнен расчет ее на прочность методом конечных элементов. Приведены результаты расчетов и анализа напряженно-деформированного состояния. Полученная закономерность распределения напряжений в элементах колонны наглядно показала, что напряжения распределены неравномерно; напряженно-деформированное состояние элементов портала является достаточно сложным, неравномерным и требует модернизации. **Научная новизна.** Получили дальнейшее развитие существующие методы проектирования металлоконструкций порталных кранов. Впервые предложена методика проектирования рациональных металлоконструкций по критериям равномерности распределения напряжений и плавности силового потока, которые также впервые получили научное обоснование. Впервые разработаны твердотельные модели металлоконструкции порталного крана, которые позволяют определять закономерность распределения напряжений/нагрузок и плавности силового потока в них. **Практическая значимость.** Разработана и внедрена пространственная твердотельная компьютерная модель портала крана «Азовец». Предложена методика прочностного анализа и рационального проектирования металлоконструкции порталных кранов. Предложены научно обоснованные рекомендации по ремонту и усилению элементов портала крана «Азовец». Результаты теоретических и практических исследований могут быть использованы при преподавании учебных курсов «Проектирование металлических конструкций подъемно-транспортных машин», «Основы автоматизированного проектирования машин», «Автоматизированное проектирование ПТМ», «Ремонт, монтаж и смазки ПТМ». Например, данные результаты используют в ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет».

Ключевые слова: металлоконструкция; порталный кран; моделирование; нагруженность; метод конечных элементов; синтез; оптимизация

Y. H. SAHIROV^{1*}, V. V. SUGLOBOV²

^{1*}Dep. «Lifting-Transport Machines and Machine Parts», State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Universitetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (096) 307 93 14, e-mail sagirov1978@ukr.net, ORCID 0000-0002-8854-0639

²Dep. «Lifting-Transport Machines and Machine Parts», State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Universitetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 623 12 69, e-mail suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

MODELING OF LOADING AND ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PORTAL CRANE GANTRY ELEMENT

Purpose. The main purpose of this work is to simulate the gantry loading during operation of the Azovets portal crane, the analysis of the actual stress-strain state of the gantry metal structure elements. The object of the study is the pattern of stress distribution in the gantry elements. **Methodology.** To achieve this purpose the following methods were used: analytical engineering calculations, simulation modeling, finite elements, and visual-optical method for examining the state of the crane metal structure. **Findings.** The loaded state of the metal structure of the portal crane was modeled with the use of the CAD/CAE system and its strength was calculated by the finite element method. The results of calculations and analysis of the stress-strain state are given. The obtained regularity of stress distribution in the pillar elements clearly showed that the stresses are unevenly distributed. The stress-strain state of the portal elements is rather complicated, uneven and requires modernization. **Originality.** The existing methods for the metal structures design of portal cranes were further developed. For the first time, a methodology of designing rational metal structures according to the criteria of uniform stress distribution and smoothness of the power flow was proposed. For the first time, the criteria for assessing the uniformity of stress distribution and smoothness of power flow scientifically substantiated. For the first time, solid-state models of the portal crane metal structure were developed, which allow determining the pattern of stress/load distribution and smoothness of the power flow in them. **Practical value.** A spatial solid-state computer model of the Azovets portal crane and a methodology for strength analysis and rational design of the metal structure for portal cranes were developed and implemented. The recommendations for repair and strengthening of the gantry components of the Azovets portal crane were scientifically grounded. The results of theoretical and practical research are used in the State Higher Educational Institution «PSTU» in teaching the courses «Designing Metal Structures LTM», «Basics of Computer Aided Design of Machines», «Automated Designing LTM», «Repair, Installation and Lubricants LTM».

Keywords: metal construction; portal crane; modeling; workload; finite element method; synthesis; optimization

REFERENCES

1. Androshchuk, H. O. (2017). Additive Technology: Prospects and Challenges 3d-Print. *Science, Technologies, Innovations*, 1, 68-77. (in Ukrainian)
2. Sahirov, Y., Suglobov, V., & Kukhar, V. (2018). Modern Condition and Perspectives of Optimization Projection of Metal Constructions of Portal Cranes. *Science and production*, 19, 59-68. (in Ukrainian)
3. Sagirov, Y. G. (2012). *Utochnennyi metod analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kolonny portalnogo krana, Peredovye nauchnye razrabotki, Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya*. Praga. (in Russian)
4. Gokhberg, M. M. (Ed). (1988). *Spravochnik po kranam* (Vol. 1-2). Leningrad: Mashinostroenie. (in Russian)
5. Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (2004). *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6> (in English)
6. Boyd, S. (2010). Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 3(1), 1-122. doi: <https://doi.org/10.1561/22000000016> (in English)
7. Caterpillar opens 3D Printing & Innovation Accelerator at Illinois HQ. *Identify3D*. Retrieved from <https://identify3d.com/blog/caterpillar-opens-3d-printing-innovation-accelerator-at-illinois-hq/> (in English)
8. Deng, S., & Suresh, K. (2014). Multi-constrained topology optimization via the topological sensitivity. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 51(5), 987-1001. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-014-1188-6> (in English)

МАШИНОБУДУВАННЯ

9. Fu, J., Li, H., Gao, L., & Xiao, M. (2019). Design of shell-infill structures by a multiscale level set topology optimization method. *Computers & Structures*, 212, 162-172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.10.006> (in English)
10. Grierson, D. E., & Khajepour, S. (2002). Conceptual design optimization of engineering structures. In S. Burns (Ed.), *Recent advances in optimal structural design*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 81-95. (in English)
11. Wu, Z., Xia, L., Wang, S., & Shi, T. (2019). Topology optimization of hierarchical lattice structures with substructuring. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 345, 602-617. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.003> (in English)
12. Wohlers, T. (2014). *Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report*. Wohlers Associates. Retrieved from <https://wohlersassociates.com/2014-ExSum.pdf> (in English)
13. 5 things every manufacturer needs to know about 3d printing. *Association of Equipment Manufacturers*. Retrieved from <https://www.aem.org/news/february-2018/5-things-every-manufacturer-needs-to-know-about-3d-printing/> (in English)

Надійшла до редколегії: 24.01.2019

Прийнята до друку: 23.05.2019

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.32/34-046.55

А. П. ИВАНОВА^{1*}, С. О. БАРСУКОВА^{2*}, А. В. ХАЛИМЕНДИК^{3*}, А. Н. ЧУМАК^{4*}

^{1*}Каф. «Строительство, геотехника и геомеханика», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. Д. Яворницкого, 19, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (050) 452 99 45, эл. почта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

^{2*}Каф. «Строительство, геотехника и геомеханика», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. Д. Яворницкого, 19, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (050) 482 36 14, эл. почта sofikoivanova@gmail.com, ORCID 0000-0003-0821-1091

^{3*}Каф. «Строительство, геотехника и геомеханика», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. Д. Яворницкого, 19, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (050) 905 42 62, эл. почта khalymendyk.o.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-1311-1135

^{4*}Каф. «Строительство, геотехника и геомеханика», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. Д. Яворницкого, 19, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (050) 854 25 58, эл. почта rotwespe@gmail.com, ORCID 0000-0003-4584-4111

АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ И БЕТОНЫ

Цель. В данной работе предполагается исследовать влияние условий и параметров микроволнового излучения на изменение физико-механических свойств строительных материалов, в частности оценить стабильность их прочностных характеристик. **Методика.** Были использованы следующие методы: исследование влияния СВЧ-нагрева на кинетику свойств изделий; определение предела прочности растворов и бетонов на сжатие; сравнительный анализ. В качестве образцов были избраны цементно-песчаные кубики размером 5×5×5 см, изготовленных согласно ДСТУ Б В.2.7-187:2009, с выдержкой для приобретения ими марочной прочности в течение 28 суток. **Результаты.** Эксперимент заключался в определении влияния мощности СВЧ-излучения и продолжительности его воздействия на изменение прочностных характеристик сухих (естественной влажности) образцов и образцов, насыщенных водой. В ходе эксперимента было проведено испытание на прочность при одноосном сжатии сухих и насыщенных водой образцов, предварительно подвергнутых воздействию СВЧ-излучения (минимальной, средней и максимальной мощности) в диапазоне времени от 1 до 3 мин. Наибольшие разрушающие воздействия СВЧ-излучения на цементно-песчаные образцы достигнуты при значениях мощности от 500 до 900 Вт и продолжительности 2–3 мин.

Научная новизна. В данной работе исследовано влияние мощности СВЧ-излучения и продолжительности его воздействия на процесс разрушения цементно-песчаных образцов. **Практическая значимость.** Установлено, что обработка материалов СВЧ-излучением облегчает процесс их разрушения. Предложенная технология позволит получить научную базу для использования СВЧ-излучения с целью разрушения не только бетона и других строительных материалов, но и горных пород. Также перспективным направлением является изучение обратной задачи – применение СВЧ-излучения при растворении бетонной или другой строительной смеси водой, что в дальнейшем, после ее затвердевания, приведет к повышению прочности изделий.

Ключевые слова: СВЧ-излучение; образцы цементно-песчаных кубиков; эксперимент; мощность излучения; прочность; процесс разрушения

Введение

В настоящее время СВЧ-энергетика играет существенную роль во многих отраслях экономики. Она относится к числу энергосберегаю-

щих, поэтому в последние годы наблюдается рост интереса к практическому использованию СВЧ-энергии в промышленных целях.

Основные направления использования энергии сверхвысоких частот:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- оттаивание мерзлых грунтов;
- разупрочнение и дробление пород;
- разделение руды на составляющие;
- полное извлечение металлов из отходов и шламов [7].

Микроволновое излучение имеет ряд преимуществ:

- быстрый и бесконтактный нагрев;
- практически к любому участку нагреваемого тела просто передается СВЧ-энергия, а не тепла;
- равномерный нагрев;
- обеспечивает возможность практически мгновенного выключения теплового воздействия на обрабатываемый материал;
- СВЧ-нагрев имеет высокий КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую энергию, теоретическое значение этого КПД близко к 100 %;
- высокий уровень безопасности и автоматизации.

Необходимо отметить, что способ разрушения твердых структур с использованием СВЧ разрабатывается применительно к горным породам. Изучением же разрушающего влияния СВЧ-излучения на строительные материалы, в частности на бетоны и затвердевшие растворы, практически никто не занимался, как и не объединяли воедино действие таких параметров, как мощность излучения, продолжительность воздействия и влияние влажности на их физико-механические свойства.

В работах В. М. Петрова [6] дан обзор применения мощных источников электромагнитного поля СВЧ в горной промышленности для разупрочнения горных пород, приведены диэлектрические характеристики минералов, рассмотрен механизм термомеханического разрушения породы СВЧ-полем и требования к режиму разупрочнения перед помолотом, а также описаны результаты пробных экспериментов.

В свою очередь в исследованиях Н. Satish [10] указано на положительное влияние низкоэнергетических значений микроволнового излучения в диапазоне 150 Вт на образование термических трещин в структуре образцов базальтовых пород.

В своей работе D. A. Jones [14] моделирует предварительное возникновение термальных трещин в образцах рудных пород от действия

СВЧ-излучения для облегчения их последующего разрушения.

Rejman Nekoovaght [12, 13] указывает, что микроволны проникают в породу и создают макро/микроразрушения на поверхности горных пород из-за коэффициента теплового расширения внутри зерен, что облегчает процесс разрушения.

Комплексные исследования, проведенные в работе [11] посвящены практическому применению механического разрушения горных пород при помощи микроволнового излучения, также представлено трехмерное моделирование влияния СВЧ - излучения на напряжения в образцах гранита.

В статье И. А. Женжуриста [3] показано, что микроволновая обработка полем СВЧ глинистых композиций положительно отражается на прочностных свойствах обожженных изделий.

Предварительные аналитические исследования, приведенные в работе [9], показывают, что при использовании СВЧ-излучения в области химии, строительных материалов особо важную роль наряду с объемным внутренним разогревом материала играет так называемый нетермический эффект.

Влияние СВЧ-излучения на незатвердевшую бетонную или растворную смесь имеет совершенно иной результат. В процессе приготовления раствора на основе цемента проводят его облучение электромагнитным полем после растворения водой.

Если при тепловой обработке происходило нагревание верхних слоев материала и последующая передача тепла от более нагретых слоев к менее нагретым, то при обработке СВЧ-излучением происходит внутренний нагрев бетонной или растворной смеси. Облучение раствора осуществляют электромагнитным полем сверхвысокой частоты, сопровождающееся нагревом раствора.

Целесообразно применение СВЧ-излучения при удалении воды из внутренних слоев растворной смеси за счет воздействия на молекулы воды, результат заключается в повышении прочности изделий на основе цементных растворов [1, 8].

Исследования Аржанникова А. В., Быченкова В. А. и других носят несколько разрозненный характер. В работе [5] сформулированы требования к СВЧ – генератору, определен диапазон

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

электродинамических параметров, в пределах которого использование СВЧ-излучения для разрушения бетона наиболее эффективно.

Перспективным направлением исследований является не только проблема оценки качества обеспечения стабильности прочностных характеристик материалов [4], но и влияние условий микроволнового излучения на изменение их физических свойств.

В данной работе сделана попытка исследовать влияние мощности излучения и продолжительности его воздействия на процесс разрушения цементно-песчаных образцов. Это позволит получить научную базу использования СВЧ-излучения для разрушения не только бетона и других строительных материалов, но и горных пород.

Цель

Основной целью данной научной работы является исследование влияния условий и параметров микроволнового излучения на изменение физико-механических свойств строительных материалов, в частности оценка стабильности их прочностных характеристик.

Для достижения этой цели необходимо экспериментально выявить влияние длительности и мощности СВЧ-излучения на прочностные характеристики образцов цементно-песчаного раствора.

Методика

В работе были использованы следующие методы: исследование влияния СВЧ-нагрева на кинетику свойств изделий; определение предела прочности растворов и бетонов на сжатие; сравнительный анализ. Для проведения эксперимента применена печь СВЧ марки «Fairline» с диапазоном излучения: минимальный – 100 Вт, средний – 500 Вт, максимальный – 900 Вт, а также пресс KL-200/R компании «Tecnotest».

В качестве образцов были избраны цементно-песчаные кубики размером 5×5×5 см. Их предварительно приготовили из необходимого количества цементно-песчаного раствора состава 1:3 (по массе) при водоцементном отношении В/Ц = 0,45. Количество компонентов дозировали с использованием электронных весов. Цемент с песком перемешивали в течение

1 мин. Затем в центре сухой смеси сделали лунку, в которую добавили воду в необходимом количестве. Вода впитывалась в смесь в течение 30 с, после чего смесь перемешивали вручную круглым шпателем в течение 8 мин (по нормам не менее 5 мин при перемешивании вручную).

Полученной растворной смесью нормальной консистенции заполнили формы – кубики. Затем каждую форму вибрировали на вибрационном столе в течение 15 с. Данная рецептура была использована при изготовлении всех кубиков для исследования. После выдержки в течение суток кубики извлекли из форм и поместили в шкаф с влажными опилками для приобретения прочности в течение 27 суток. После 28 суток выдержки кубики были готовы для проведения эксперимента [2].

Результаты

Для проведения эксперимента были приготовлены 24 цементно-песчаных кубика. Эксперимент заключался в определении влияния мощности СВЧ-излучения и продолжительности его воздействия на изменение прочностных характеристик сухих (естественной влажности) образцов и образцов, насыщенных водой.

В ходе эксперимента было проведено испытание на прочность при одноосном сжатии сухих и насыщенных водой образцов, предварительно подвергнутых воздействию СВЧ-излучения (минимальной, средней и максимальной мощности) в диапазоне времени от 1 до 3 мин.

Для эксперимента были взяты 6 кубиков (3 сухих и 3 насыщенных водой), которые не подвергались воздействию СВЧ-излучения и служили контрольными образцами. На испытательном прессе была определена их прочность. По результатам трех испытаний среднее значение прочности образцов составило:

- для сухих – 37,2 Н/мм²;
- для насыщенных водой – 30,5 Н/мм².

На следующем этапе эксперимента были взяты 9 кубиков, которые в течение 2 ч насыщались водой. Насыщенные водой кубики были подвержены СВЧ-излучению в течение 1, 2 и 3 мин на минимальной, средней и максимальной мощности. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Прочность насыщенных водой образцов

Table 1

Strength of water saturated samples

Время воздействия СВЧ-излучения	Прочность насыщенных водой образцов, МПа (Н/мм ²)		
	Мощность 100 Вт	Мощность 500 Вт	Мощность 900 Вт
1 мин	29,64 (2,78)*	28,53 (6,42)	26,16 (14,20)
2 мин	27,65 (9,31)	27,11 (11,08)	22,92 (24,82)
3 мин	26,5 (13,08)	17 (44,24)	16,12 (47,13)

* – в скобках указана потеря прочности в % относительно контрольных образцов

На последнем этапе эксперимента были использованы очередные 9 цементно-песчаных кубиков естественной влажности. Образцы были подвержены СВЧ-излучению в течение 1,

2 и 3 мин при минимальной, средней и максимальной мощности. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Прочность сухих образцов

Table 2

Strength of dry samples

Время воздействия СВЧ-излучения	Прочность образцов естественной влажности (сухих), МПа (Н/мм ²)		
	Мощность 100 Вт	Мощность 500 Вт	Мощность 900 Вт
1 мин	36,16 (2,7)*	36,08 (2,9)	32,23 (13,3)
2 мин	34,65 (6,8)	32,05 (13,8)	28,33 (23,8)
3 мин	33,91 (8,8)	27,7 (25,5)	27,33 (27,03)

* – в скобках указана потеря прочности в % относительно контрольных образцов

Обработка образцов СВЧ-излучением в большей степени влияет на снижение прочности насыщенных водой образцов. Это происходит из-за того, что молекулы воды, находящейся в структуре растворной смеси, при нагреве под воздействием микроволнового излучения начинают активное движение (колебания в пределах отдельных кластеров), причем в ходе этого движения происходит формирование микронарушений.

Воздействие микроволнового излучения на цементно-песчаные образцы естественной влажности (сухие) приводит к снижению их прочности от 2,7 до 13 % при диапазоне СВЧ-излучения от 100 до 900 Вт в течение 1 мин, от 8,8 до 27 % при воздействии в тех же диапазо-

нах мощности в течение 3 мин (рис. 1).

Но следует отметить, что перспективным направлением дальнейших исследований является изучение обратной задачи, а именно применение СВЧ-излучения при растворении бетонной или другой смеси водой, что в дальнейшем, после ее затвердевания, приведет к повышению прочности изделий.

Наибольшее воздействие СВЧ-излучения на снижение прочности образцов (при мощности излучения 900 Вт и продолжительности его действия 3 мин) наблюдается при предварительном их замачивании – до 47 % по сравнению с 27 % снижения прочности в сухих образцах (рис. 2).

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

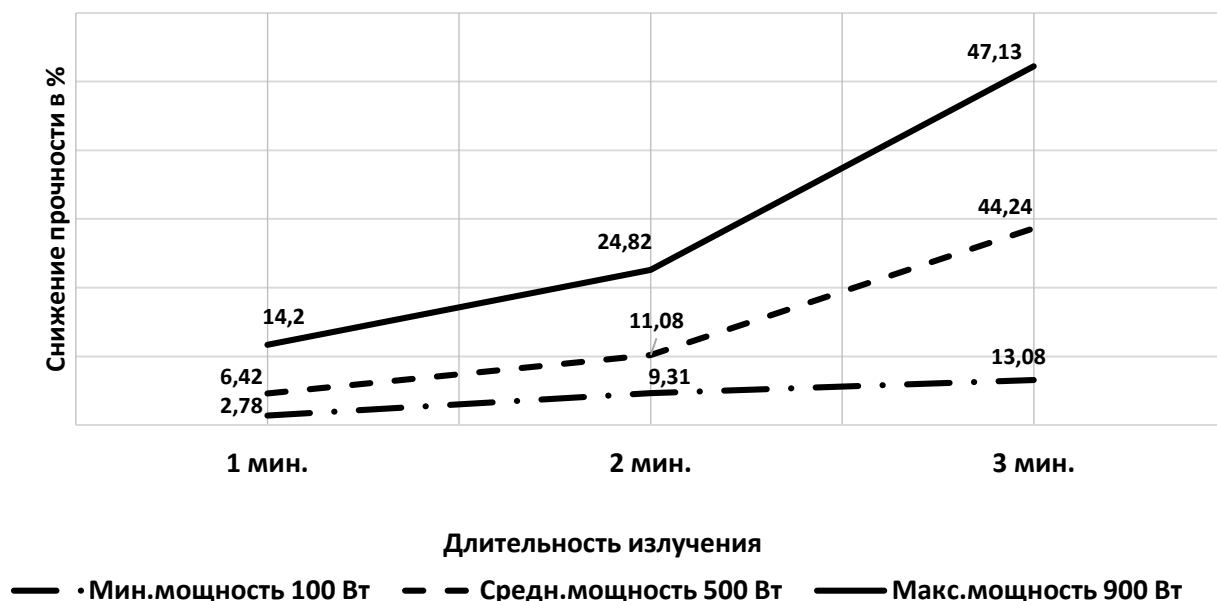


Рис. 1. Снижение прочности сухих образцов в % в зависимости от длительности излучения

Fig. 1. The strength reduction of dry samples in %, depending on the duration of radiation

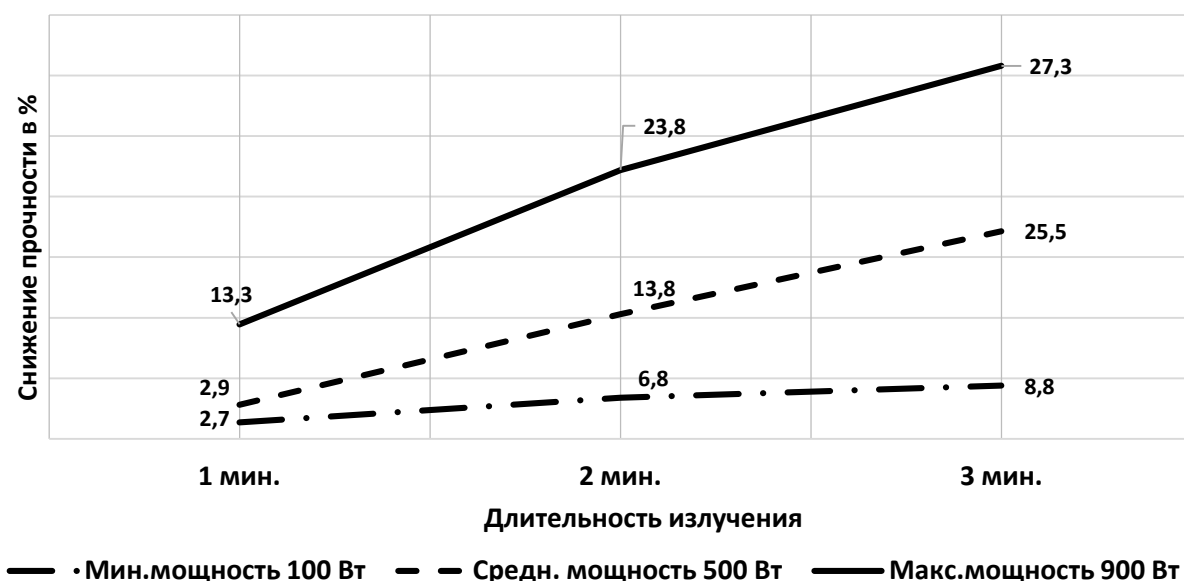


Рис. 2. Снижение прочности влажных образцов в % в зависимости от длительности излучения

Fig. 2 The strength reduction of wet samples in %, depending on the duration of radiation

Наибольшие разрушающие воздействия СВЧ-излучения на цементно-песчаные образцы достигнуты при значениях мощностей от 500 до 900 Вт в течение от 2 до 3 мин.

Научная новизна и практическая значимость

В процессе исследований установлено, что наибольшее влияние СВЧ-излучения на формирование искусственных трещин и микрона-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

рушений в цементно-песчаных образцах наблюдается при их предварительном насыщении водой и использовании мощности излучения от 500 до 900 Вт в течение 3 мин.

При меньшей продолжительности облучения наблюдаются несколько меньшие показатели потери цементно-песчаными образцами прочности относительно контрольных образцов. Однако следует отметить, что контрольный образец насыщенного водой цементно-песчаного раствора (или, по сути, мелкозернистого бетона) имел лишь 82 % прочности сухого образца.

Увлажнение цементно-песчаного раствора перед последующим микроволновым облучением способствует созданию в бетонном теле микронарушений и, соответственно, упрощает процесс разрушения.

Выводы

Установлены рекомендованные параметры обработки образцов для облегчения процесса разрушения цементно-песчаного раствора:

- предварительное насыщение бетона водой;
- мощность СВЧ-излучения для получения лучших результатов 900 Вт;
- продолжительность обработки излучением 2–3 мин.

При отсутствии возможности насыщения бетона водой эффект от действия микроволнового излучения мощностью 900 Вт с той же продолжительностью (2–3 мин) будет на 62–65 % ниже (прочность сухих образцов состав-

ляет 27 МПа по сравнению с 17 МПа для влажных).

Проведенные исследования, на наш взгляд, перспективны при решении одной из актуальных экологических проблем, а именно очистки и «реабилитации» строений, загрязненных радиоактивными отходами. В основе такого метода очистки лежат два процесса: 1) отколы на свободной поверхности под действием ударной волны, генерируемой при локальном нагреве поверхностного слоя твердого тела мощным СВЧ-излучением; 2) хрупкое разрушение приповерхностного слоя при сдвиговой деформации из-за сильной анизотропности напряженного состояния. К несомненным достоинствам метода очистки с использованием мощных импульсных потоков СВЧ-излучения относятся дистанционное управление процессом, гарантирующее отсутствие прямого контакта персонала с радиоактивными загрязнениями, относительная безопасность используемого в технологии электромагнитного излучения и, наконец, возможность создания мобильной установки. В связи с вышесказанным представляет интерес определение характерных параметров СВЧ-излучения для разрушения поверхностного слоя бетона, использующегося на атомных станциях.

Возможно использование СВЧ-излучений в технологии изготовления бетонов, строительных растворов и смесей, а также при переработке, цементировании жидких и твердых радиоактивных отходов, в частности их захоронении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Высокотемпературное воздействие СВЧ-излучения на несовершенные диэлектрики / А. Н. Диденко, М. С. Дмитриев, А. Д. Коляскин, Ю. Д. Пименов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2008. – № 2. – С. 55–63.
2. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 18 с.
3. Женжурис, И. А. Эффективность микроволновой обработки глинистых композиций при подборе шихты в технологии керамики / И. А. Женжурис // Строительные материалы. – 2015. – № 4. – С. 60–65.
4. Иванова, А. П. Анализ и перспективы применения эффективных ресурсосберегающих технологий в производстве бетона / А. П. Иванова, О. И. Труфанова // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 150–156. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2014/30453>
5. О возможности разрушения поверхности бетона мощными импульсами СВЧ-излучения / А. В. Аржанников, В. А. Быченков, П. В. Калинин, Г. В. Коваленко, В. С. Койдан, Ю. Н. Лазарев, К. И. Меклер, П. В. Петров, А. В. Петровцев // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 3. – С. 26–33.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

6. Опыт применения энергии микроволн в горном деле / Д. Л. Рахманкулов, С. Ю. Шавшукова, И. Н. Вихарева, Р. Р. Чанышев // Башкирский химический журнал. – 2008. – Т. 15, № 2. – С. 114–117.
7. Петров, В. М. Новые применения радиоэлектроники: разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ / В. М. Петров // Радиоэлектроника и Телекоммуникации. – 2002. – № 2 (20). – С. 35–41 ; № 3 (21). – С. 49–55 ; № 4 (22). – С. 63–73.
8. Ревенко, Б. С. Получение ячеистых бетонов с привлечением СВЧ-технологий / Б. С. Ревенко // Молодой учёный. – 2017. – № 14 (148). – С. 118–119.
9. Сердюк, В. Р. Теоретические предпосылки внедрения СВЧ-излучений при активации золы-уноса для бетонных смесей / В. Р. Сердюк, А. С. Сидлак // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка : наук.-тех. зб. – Київ, 2015. – Вип. 56. – С. 104–110.
10. Investigating microwave assisted rock breakage for possible space mining applications / H. Satish, J. Ouellet, V. Raghavan, P. Radziszewski // Mining Technology. – 2006. – Vol. 115. – P. 34–40. doi: <https://doi.org/10.1179/174328606x101902>
11. Nekoovaght, P. Microwave Assisted Rock Breakage for Space Mining: Earth and Space 2014 [Электронный ресурс] / P. Nekoovaght, N. Gharib, F. Hassani // American Society of Civil Engineers. – Режим доступа: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784479179.044> – Загл. с экрана. – Проверено : 30.05.2019. doi: <https://doi.org/10.1061/9780784479179.044>
12. Nekoovaght, P. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation / P. Nekoovaght, N. Gharib, F. Hassani // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – Vol. 8. – P. 1–15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.004>
13. Numerical study of the influence of irradiation parameters on the microwave-induced stresses in granite / M. Toifl, P. Hartlieb, R. Meisels, T. Antretter, F. Kuchar // Minerals Engineering. – 2017. – Vol. 103-104. – P. 78–92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.011>
14. Understanding microwave assisted breakage / D. A. Jones, S. W. Kingman, D. N. Whittles, I. S. Lowndes // Minerals Engineering. – 2005. – Vol. 18. – Iss. 7. – P. 659–669. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.011>

Г. П. ІВАНОВА^{1*}, С. О. БАРСУКОВА^{2*}, О. В. ХАЛИМЕНДИК^{3*}, О. М. ЧУМАК^{4*}

^{1*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 452 99 45, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

^{2*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 482 36 14, ел. пошта sofikoivanova@gmail.com, ORCID 0000-0003-0821-1091

^{3*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 905 42 62, ел. пошта khalymendyk.o.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-1311-1135

^{4*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 854 25 58, ел. пошта rotwespe@gmail.com, ORCID 0000-0003-4584-4111

АНАЛІЗ І ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ НВЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БУДІВЕЛЬНІ РОЗЧИНИ Й БЕТОНИ

Мета. У цій роботі передбачено дослідити вплив умов і параметрів мікрохвильового випромінювання на зміну фізико-механічних властивостей будівельних матеріалів, зокрема оцінити стабільність їх міцності. **Методика.** Було використано наступні методи: дослідження впливу НВЧ-нагрівання на кінетику властивостей виробів; визначення межі міцності розчинів і бетонів на стиск; порівняльний аналіз. Як зразки було взято цементно-піщані кубики розміром 5×5×5 см, виготовлені згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009, із витримкою для набуття ними марочної міцності протягом 28 діб. **Результати.** Експеримент полягав у визначенні впливу потужності НВЧ-випромінювання й тривалості його впливу на зміну міцності сухих (природної вологості) зразків і зразків, насичених водою. У ході експерименту було проведено випробування на міцність у разі одновісного стискання сухих і насичених водою зразків, які попередньо зазнали впливу НВЧ-випромінювання (мінімальної, середньої й максимальної потужності) в діапазоні часу від 1 до 3 хв. Найбільший руйнівний вплив НВЧ-випромінювання на цементно-піщані зразки досягнутий за значення

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

потужності від 500 до 900 Вт і тривалості 2–3 хв. **Наукова новизна.** У цій роботі досліджено вплив потужності НВЧ-випромінювання і тривалості його дії на процес руйнування цементно-піщаних зразків. **Практична значимість.** Установлено, що параметри обробки матеріалів НВЧ-випромінюванням полегшує процес їх руйнування. Запропонована технологія дозволить отримати наукову базу для використання НВЧ-випромінювання з метою руйнування не тільки бетону й інших будівельних матеріалів, але й гірських порід. Також перспективним напрямком є вивчення зворотної задачі – застосування НВЧ-випромінювання під час замішування бетонної або іншої будівельної суміші з водою, що в подальшому, після її затвердіння, призведе до підвищення міцності виробів.

Ключові слова: НВЧ-випромінювання; зразки цементно-піщаних кубиків; експеримент; потужність випромінювання; міцність; процес руйнування

G. P. IVANOVA^{1*}, S. O. BARSUKOVA^{2*}, O. V. KHALYMENDYK^{3*}, O. M. CHUMAK^{4*}

^{1*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», National Technical University «Dnipro Polytechnic», D. Yavornytskyi Av., Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 905 42 62, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

^{2*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», National Technical University «Dnipro Polytechnic», D. Yavornytskyi Av., Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 905 42 62, e-mail sofikoivanova@gmail.com, ORCID 0000-0003-0821-1091

^{3*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», National Technical University «Dnipro Polytechnic», D. Yavornytskyi Av., Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 905 42 62, e-mail khalymendyk.o.v@nmu.one, ORCID 0000-0002-1311-1135

^{4*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», National Technical University «Dnipro Polytechnic», D. Yavornytskyi Av., Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 854 25 58, e-mail rotwespe@gmail.com, ORCID 0000-0003-4584-4111

ANALYSIS AND PERSPECTIVES OF RESEARCH ON THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION ON MORTARS AND CONCRETES

Purpose. In this work, we study the influence of the conditions and parameters of microwave radiation on the change in the physico-mechanical properties of building materials, in particular the problem of assessing the stability of their strength characteristics. **Methodology.** The following methods were used in the work: the study of the influence of microwave heating on the kinetics of the products' properties, the determination of the ultimate compression strength of mortars and concrete and comparative analysis. 5×5×5 cm cement-sand cubes made according to the SSU B V.2.7-187: 2009 were used as samples. They were cured during 28 days for grade strength acquiring. **Findings.** The experiment was to determine the effect of microwave radiation power and the duration of its influence on changes in the strength characteristics of dry (natural moisture) and water-saturated samples. In the course of the experiment, the uniaxial compression strength of dry and water-saturated samples previously subjected to microwave radiation (minimum, average, and maximum power) during 1-3 minutes was performed. The greatest destructive effects of microwave radiation on cement-sand samples are achieved at power values from 500 to 900 W and duration from 2 to 3 minutes. **Originality.** In this work, the effect of the following parameters of microwave radiation is investigated: the radiation power and the duration of its effect on the destruction process of cement-sand samples. **Practical value.** The established parameters of processing samples with microwave radiation facilitate the process of their destruction. This will provide a scientific basis for the use of microwave radiation in order to destroy not only concrete and other building materials, but also rocks. Also a promising direction is the study of the inverse problem – the use of microwave radiation when dissolving the concrete or mortar mixture in water, which later, after its solidification, will lead to product strength increase from these mixtures.

Keywords: microwave radiation; samples of cement-sand cubes; experiment; radiation power; strength; destruction process

REFERENCES

1. Didenko, A. N., Dmitriev, M. S., Kolyaskin, A. D., & Pimenov, Y. D. (2008). Vysokotemperaturnoe vozdeystvie SVCh-izlucheniya na nesovershennyye dielektriki. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2, 55-63. (in Russian)
2. Budivelni materialy. Tsementy. Metody vyznachennia mitsnosti na zghyn i stysk, 18 DSTU B V.2.7-187:2009 (2010). (in Ukrainian)
3. Zhenzhurist, I. A. (2015). Efficiency of Micro-Wave Treatment of Clay Compositions when Selecting the Charge in Technology of Ceramics. *Stroitel'nye Materialy*, 4, 60-65. (in Russian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Ivanova, H. P., & Trufanova, O. I. (2014). Analysis and Application Prospects of Effective Resources-Saving Technologies in Concrete Manufacture. *Science and Transport Progress*, 5(53), 150-156. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2014/30453> (in Russian)
5. Arzhannikov, A. V., Bychenkov, V. A., Kalinin, P. V., Kovalenko, G. V., Koydan, V. S., Lazarev, Y. N., ... Petrovtsev, A. V. (2000). O vozmozhnosti razrusheniya poverkhnosti betona moshchnymi impulsami SVCh-izlucheniya. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 41(3), 26-33. (in Russian)
6. Rakhmankulov, D. L., Shavshukova, S. Y., Vikhareva, I. N., & Chanyshv, R. R. (2008). Opyt primeneniya energii mikrovoln v gornom dele. *Bashkir chemistry journal*, 15(2), 114-117. (in Russian)
7. Petrov, V. M. (2002). Novye primeneniya radioelektroniki: razuprochnenie gornykh porod moshchnym elektromagnitnym polem SVCh. *Radioelektronika i Telekommunikatsii*, 2(20), 35-41, 3(21), 49-55, 4(22), 63-73. (in Russian)
8. Revenko, B. S. (2017). Obtaining Cellular Concrete with the Assistance of Microwave Technologies. *Young Scientist*, 14(148), 118-119. (in Russian)
9. Serdyuk, V. R., & Sidlak, A. S. (2015). Theoretical Background of Microwave Radiation Introduction Activation Fly Brought Out for Concrete Mixtures. *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika*, 56, 104-110. (in Russian)
10. Satish, H., Ouellet, J., Raghavan, V., & Radziszewski, P. (2006). Investigating microwave assisted rock breakage for possible space mining applications. *Mining Technology*, 115(1), 34-40. doi: <https://doi.org/10.1179/174328606x101902> (in English)
11. Nekoovaght, P., Gharib, N., & Hassani, F. (2015). Microwave Assisted Rock Breakage for Space Mining: Earth and Space 2014. *American Society of Civil Engineers*. Retrieved from <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784479179.044> doi: <https://doi.org/10.1061/9780784479179.044> (in English)
12. Nekoovaght, P., Gharib, N., & Hassani, F. (2016). The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 1-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.004> (in English)
13. Toifl, M., Hartlieb, P., Meisels, R., Antretter, T., & Kuchar, F. (2017). Numerical study of the influence of irradiation parameters on the microwave-induced stresses in granite. *Minerals Engineering*, 103-104, 78-92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.011> (in English)
14. Jones, D. A., Kingman, S. W., Whittles, D. N., & Lowndes, I. S. (2005). Understanding microwave assisted breakage. *Minerals Engineering*, 18(7), 659-669. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.011> (in English)

Поступила в редколлегию: 06.02.2019

Принята к печати: 04.06.2019

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**М. М. БІЛЯЄВ, І. В. КАЛАШНІКОВ,
В. І. ШИНКАРЕНКО, В. М. ГОРЯЧКІН**
ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ПІД ЧАС
ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ НА ХІМІЧНО
НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ 7

Т. І. РУСАКОВА
МЕТОД ПРОГНОЗУ ПАРАМЕТРІВ АЕРОІОННОГО
РЕЖИМУ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ВІДКРИТІЙ
МІСЦЕВОСТІ 16

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

О. Л. ДРОЖЖИН, Ю. О. КОСКІНА
ПОЛІСЕМІЧНІСТЬ ПОНЯТЬ «ДЕМЕРЕДЖ» І
«ДЕТЕНШЕН» У ПРАКТИЦІ ЛІНІЙНОГО Й
ТРАМПОВОГО СУДНОПЛАВСТВА 27

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

А. ЗАРКЕШЕВ, С. ЧІСАР
ГІДРОЕЛЕКТРИЧНА ДОРОЖНЯ ЕСТАКАДА 36

М. Г. ПРИТУЛА, О. А. ПАСЕЧНИК
ОПТИМІЗАЦІЙНІ ТЯГОВІ ЗАДАЧІ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ
МЕРЕЖІ 44

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

А. НЕМЕС, С. ФІШЕР
РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ
КЛЕЙОВИХ ІЗОСТИКІВ ІЗ ТРАДИЦІЙНИМИ
СТАЛЕВИМИ Й ПОСИЛЕНИМИ
СКЛОПЛАСТИКОВИМИ НАКЛАДКАМИ 65

О. М. ПАТЛАСОВ, Є. М. ФЕДОРЕНКО
ВПЛИВ ВАГОНІВ З ОСЬОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ 25
ТС/ВІСЬ НА СТАН ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ 87

Є. ЮХАС, С. ФІШЕР
УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ
РУЙНУВАННЯ ЧАСТОК ЗАЛІЗНИЧНОГО
БАЛАСТУ 96

МАШИНОБУДУВАННЯ

Ю. Г. САГІРОВ, В. В. СУГЛОБОВ
МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТА АНАЛІЗ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ЕЛЕМЕНТІВ ПОРТАЛУ КРАНА 110

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Г. П. ІВАНОВА, С. О. БАРСУКОВА,
О. В. ХАЛИМЕНДИК, О. М. ЧУМАК**
АНАЛІЗ І ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ
НВЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БУДІВЕЛЬНІ
РОЗЧИНИ Й БЕТОНИ 121

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, И. В. КАЛАШНИКОВ,
В. И. ШИНКАРЕНКО, В. Н. ГОРЯЧКИН**
ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ХИМИЧЕСКИ
ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ 7

Т. И. РУСАКОВА
МЕТОД ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ АЭРОИОННОГО
РЕЖИМА В РАБОЧИХ ЗОНАХ НА ОТКРЫТОЙ
МЕСТНОСТИ 16

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

А. Л. ДРОЖЖИН, Ю. А. КОСКИНА
ПОЛИСЕМИЧНОСТЬ ПОНЯТИЙ «ДЕМЕРЕДЖ» И
«ДЕТЕНШЕН» В ПРАКТИКЕ ЛИНЕЙНОГО И
ТРАМПОВОГО СУДОХОДСТВА 27

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

А. ЗАРКЕШЕВ, С. ЧИСАР
ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДОРОЖНАЯ
ЭСТАКАДА 36

М. Г. ПРИТУЛА, А. А. ПАСЕЧНИК
ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ТЯГОВЫЕ ЗАДАЧИ НА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ 44

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ

А. НЕМЕС, С. ФИШЕР
РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ
КЛЕЕВЫХ ИЗОСТЫКОВ С ТРАДИЦИОННЫМИ
СТАЛЬНЫМИ И УСИЛЕННЫМИ
СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫМИ НАКЛАДКАМИ 65

А. М. ПАТЛАСОВ, Е. М. ФЕДОРЕНКО
ВЛИЯНИЕ ВАГОНОВ С ОСЕВОЙ НАГРУЗКОЙ
25 ТС/ОСЬ НА СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ПУТИ 87

Е. ЮХАС, С. ФИШЕР
УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ
РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
БАЛЛАСТА 96

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ю. Г. САГИРОВ, В. В. СУГЛОБОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ И АНАЛИЗ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ПОРТАЛА КРАНА 110

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

**А. П. ИВАНОВА, С. О. БАРСУКОВА,
А. В. ХАЛИМЕНДИК, А. Н. ЧУМАК**
АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ВЛИЯНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ
РАСТВОРЫ И БЕТОНЫ 121

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

**M. M. BILIAIEV, I. V. KALASHNIKOV,
V. I. SHYNKARENKO, V. M. HORIACHKIN**
ATMOSPHERE PROTECTION FROM POLLUTION IN
ACCIDENTAL SITUATIONS AT CHEMICALLY
HAZARDOUS OBJECTS..... 7

T. I. RUSAKOVA
METHOD FOR PREDICTING PARAMETERS OF THE
AERIOIONAL REGIME IN OPEN TERRAIN GROUND
AREAS..... 16

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

O. L. DROZHZHYN, Y. O. KOSKINA
POLYSEMICITY OF THE TERMS «DEMURRAGE» AND
«DETENTION» APPLIED IN THE PRACTICE OF LINER
AND TRAMP SHIPPING..... 27

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

A. ZARKESHEV, C. CSISZAR
HYDROELECTRIC ROAD RAMP 36

M. G. PRYTULA, O. A. PASECHNYK
OPTIMIZATIONAL TRACTION TASKS ON THE
RAILWAY NETWORK 44

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

A. NEMETH, S. FISCHER
LABORATORY TEST RESULTS OF GLUED INSULATED
RAIL JOINTS ASSEMBLED WITH TRADITIONAL
STEEL AND FIBRE-GLASS REINFORCED RESIN-
BONDED FISHPLATES 65

O. M. PATLASOV, E. M. FEDORENKO
IMPACT OF CARS WITH 25 TF/AXLE LOAD ON THE
TRACK CONDITION 87

E. JUHASZ S. FISCHER
SPECIFIC EVALUATION METHODOLOGY
OF RAILWAY BALLAST PARTICLES'
DEGRADATION..... 96

MECHANICAL ENGINEERING

Y. H. SAHIROV, V. V. SUGLOBOV
MODELING OF LOADING AND ANALYSIS OF THE
STRESS-STRAIN STATE OF PORTAL CRANE GANTRY
ELEMENT 110

TRANSPORT CONSTRUCTION

**G. P. IVANOVA, S. O. BARSUKOVA,
O. V. KHALYMENDYK, O. M. CHUMAK**
ANALYSIS AND PERSPECTIVES OF RESEARCH
ON THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION
ON MORTARS AND CONCRETES..... 121

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) 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),
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№3 (81) 2019

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 15,58. Тираж 100 пр. Зам. №02/03

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

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**

№ 3 (81) 2019

(на українському, російському і англійському мов)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова

Компьютерная верстка – О. В. Поминова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 15,58. Тираж 100 экз. Зак. №02/03

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адрес редакції, видавця:

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Дніпро, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Печать:

Издательство «Герда», 49000, г. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 3 (81) 2019

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 15,58. Circulation 100. Order no. 02/03

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

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

