



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 4(104)

• 2023 •

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 4 (104) 2023

Виходить 4 рази 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

2023

Засновник:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. М., доктор технічних наук

ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР

Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляев М. М., УДУНТ (Україна); Богдєвичус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Вакулєнко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головка Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., УДУНТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., УДУНТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнєцов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Сохацький А. В., Університет митної справи та фінансів (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютєкін О. Л., УДУНТ (Україна); Шинкаренко В. І., УДУНТ (Україна).

Журнал зареєстровано Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення, рішення № 924 від 28.09.2023 р.
(До 28.09.2023 р.: Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України, свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.)
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 31.01.2024 р., протокол № 6

Видавець

Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022 р.

Адреса засновника
та редакції

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: stp.journal@ust.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

1936–1993 рр. – «Труди Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
2013–2022 рр. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
з 2023 р. – «Наука та прогрес транспорту»

Ukrainian State University of Science and Technologies

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 4 (104) 2023

Once a quarter ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ 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

2023

Founder:

UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief	Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Editor	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., USUST (Ukraine); Bodnar B. E., USUST (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., USUST (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., USUST (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., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Sokhatsky A. V., University of customs and finances (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., USUST (Ukraine); Shinkarenko V. I., USUST (Ukraine); Śładkowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., USUST (Ukraine); Vakulenko I. O., USUST (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., USUST (Ukraine)

Journal was registered Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 924 dated 28.09.2023
(Until 28.09.2023: 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 category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences).
Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова, etc.
Published according to the Academic Council decision of the University from 31.01.2024, Protocol no. 6

Publisher Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro)
Certificate of Publisher ДК no. 7709 from 14.12.2022

Address of Founder Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: stp.journal@ust.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);
2013–2022 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 004.942:[519.6:628.33]

М. М. БІЛЯЄВ¹, Ю. В. БРАЗАЛУК², П. С. КІРІЧЕНКО³, П. Б. МАШИХІНА^{4*},
А. С. КОВАЛЕНКО⁵

¹Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, просп. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта brazaluk_jv@ukr.net, ORCID 0000-0001-6448-8525

³Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{4*}Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁵Кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0009-0009-9761-4300

Комп'ютерне 3D моделювання процесу очищення стічних вод у відстійнику

Мета. Відстійники широко використовують у технологічних схемах очищення стічних вод. Як правило, на практиці використовують відстійники, що мають горизонтальну форму. Але для підвищення ефективності очищення води в горизонтальному відстійнику можуть бути використані додаткові елементи, які розташовують у споруді в різних місцях. Під час реконструкції таких споруд або проектування їх для нових підприємств потрібне оцінювання ефективності роботи відстійників за різних умов експлуатації. Для розв'язання цієї задачі важливу роль відіграють математичні моделі, зокрема проведення фізичних експериментів, що потребує значного часу на отримання результатів. У випадку математичного моделювання процесу очищення води у відстійнику потрібно розв'язати дві задачі: гідродинамічну задачу та задачу масопереносу. Основною метою статті є розробка 3DCFD-моделі для розрахунку поля концентрації домішки у відстійнику. **Методика.** Для комп'ютерного розрахунку процесу очищення стічних вод у відстійнику розраховано динамічну багатофакторну чисельну модель. Гідродинаміку потоку стічних вод у відстійнику розраховано на базі тривимірного рівняння для потенціалу швидкості (модель потенціального руху). Розрахунок поля концентрації домішки у відстійнику визначено шляхом чисельного інтегрування тривимірного рівняння масопереносу. Це рівняння враховує нерівномірність поля швидкості потоку у відстійнику, процес дифузії, гравітаційне осадження домішки у споруді. Чисельне інтегрування модельованих рівнянь здійснено шляхом використання скінченнорізницевої схем розщеплення. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію побудованої математичної моделі. Наведено результати обчислювального експерименту з дослідження процесу очищення стічних вод у відстійнику з візуалізацією результатів розрахунків. **Наукова новизна.** Розроблено багатофакторну тривимірну CFD-модель, що дозволяє швидко оцінити ефективність роботи відстійника. **Практична значимість.** Запропонована CFD-модель може бути використана під час проведення розрахунків у випадку проектування систем очищення стічних вод або для визначення ефективності очищення стічних вод за нових режимів експлуатації.

Ключові слова: відстійник; очищення води; чисельне моделювання; обчислювальний експеримент

Вступ

Очищення води – дуже складний процес, у якому задіяні різні очисні споруди залежно від складу стічних вод [3, 4, 7–9, 11, 12]. У технологічних схемах очищення води дуже часто використовують відстійники. Різка зміна навантаження на відстійник може призвести до зменшення ефективності очищення води в споруді. Тому потрібно заздалегідь мати інформацію щодо ефективності очищення води у відстійниках у межах очікуваних навантажень. Для розв'язання цієї задачі важливу роль відіграють математичні моделі [1, 2]. Але слід підкреслити, що математичні моделі, які використовують зараз під час інженерних розрахунків, орієнтовані на оцінювання ефективності очищення води у відстійниках «класичної» форми та в межах визначеної витрати води та рівня її забрудненості. Для підвищення якості проектних робіт важливо, окрім спрощених математичних моделей, мати CFD-моделі [1, 2, 5, 6, 10], що дозволяють отримати більше важливої інформації для проектувальника. Тому актуальним завданням є розробка таких CFD-моделей, адже це сприяє швидкому отриманню результатів, протягом декількох хвилин, із використанням комп'ютерів малої та середньої потужності.

Мета

За основну мету статті автори ставлять розробку 3DCFD-моделі для оцінки ефективності очищення стічних вод у відстійнику.

Методика

Під час побудови математичної моделі гідродинаміки стічних вод у відстійнику та процесу масопереносу домішки в споруді будемо враховувати такі фактори:

- 3D форму відстійника;
- концентрацію домішки в стічних водах, що потрапляють до споруди;
- нерівномірність розподілу концентрації домішки у відстійнику;
- наявність додаткових елементів у відстійнику;
- гравітаційне осадження домішки у відстійнику.

Для розрахунку поля концентрації домішки у відстійнику використовуємо таке тривимірне рівняння масопереносу [1, 2]:

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

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

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

де t – час; C – концентрація домішки у відстійнику; u, v, w – компоненти швидкості потоку стічних вод у відстійнику; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти дифузії; w_g – швидкість гравітаційного осадження домішки.

Граничні умови для рівняння (1) такі:

1) на вхідному отворі: $C = C_{in}$, де C_{in} – відома концентрація домішки;

2) у вихідному отворі:

$$C(i+1, j, k) = C(i, j, k),$$

де $C(i+1, j, k)$ – концентрації домішки в останній обчислювальній комірці; $C(i, j, k)$ – концентрація домішки в попередній обчислювальній комірці;

3) на твердих поверхнях у відстійнику:

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

де n – одинична нормаль до поверхні.

Початкові умови мають вигляд за $t=0$: $C=C_0$.

Для розв'язання задачі гідродинаміки – визначення поля компонент вектора швидкості течії у відстійнику – використовуємо модель безвихрового руху рідини [1, 2]:

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

де P – потенціал швидкості.

Крайові умови для модельованого рівняння (2) наведені в [1, 2].

Компоненти вектора швидкості потоку у відстійнику визначаємо так [2]:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; v = \frac{\partial P}{\partial y}; w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (3)$$

Таким чином, для розрахунку поля швидкості потоку стічних вод у відстійнику та визначення поля концентрації в споруді потрібно розв'язати рівняння (2), (1) з урахуванням залежностей (3).

Чисельна модель. Для побудови чисельної моделі на базі диференціальних рівнянь (1) і (2) використовуємо дві скінченорізницеві схеми.

Перша схема: для чисельного інтегрування рівняння (1) попередньо здійснюємо таке його розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Тут ми візьмемо, що $w = w - w_s$.

Для чисельного інтегрування (5) використовуємо таку попеременно-трикутну різницеву схему [2]:

– перший крок розщеплення:

$$C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} = C_{ijk}^n - \Delta t \frac{w_{i+1,jk}^+ C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} - w_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} + \Delta t \mu_z \frac{-C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,jk}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} + \Delta t \mu_z \frac{-C_{ijk}^n + C_{i+1,jk}^n}{\Delta z^2};$$

– другий крок розщеплення:

$$C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{w_{i+1,jk}^- C_{i+1,jk}^{n+1} - w_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta z} + \Delta t \mu_z \frac{-C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,jk}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} + \Delta t \mu_z \frac{-C_{ijk}^{n+1} + C_{i+1,jk}^{n+1}}{\Delta z^2}.$$

На кожному кроці розщеплення невідоме значення концентрації пилу визначаємо за явною формулою біжного рахунку.

Друга схема: здійснюємо розщеплення рівняння (1) на диференціальному рівні таким чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (8)$$

За такого розщеплення рівняння масопереносу (1) отримуємо систему рівнянь, що описують перенос небезпечної речовини тільки в одному координатному напрямі. Рівняння (6)–(8) називають рівняннями Бюргерса. Розглянуте розщеплення рівняння (1) на систему рівнянь переносу (6)–(8) є основою побудови локально-одновимірної схеми.

Рівняння переносу (6)–(8) однотипні. Розглянемо принцип побудови різницевої схеми для чисельного інтегрування цих рівнянь.

Чисельне моделювання будемо проводити з використанням прямокутної різницевої сітки. Значення концентрації будемо визначати в середині комірок. Виконаємо такі перетворення:

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

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

$$\frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z};$$

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

$$v^- = \frac{v - |v|}{2}; w^+ = \frac{w + |w|}{2}; w^- = \frac{w - |w|}{2}.$$

Здійснимо подальшу апроксимацію похідних для рівнянь із системи:

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

$$-\mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1};$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

$$-\mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} -$$

$$-\mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1};$$

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

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

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

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

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1}.$$

Схему розщеплення для рівняння (6) запи-
сується так

– на першому кроці різницевого рівняння має
вигляд:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k = M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n;$$

– на другому кроці розщеплення різницевого
рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} = M_{xx}^+ C^n + M_{xx}^- C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для чисельного інтегру-
вання рівняння (7) має вигляд:

– на першому кроці різницевого рівняння буде
таким:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_y^+ C^k = M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n;$$

– на другому кроці розщеплення різницевого
рівняння набуде вигляду:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_y^- C^{n+1} = M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для чисельного інтегру-
вання рівняння (8) має вигляд:

– на першому кроці різницевого рівняння ви-
глядатиме так:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_z^+ C^k = M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n,$$

– на другому кроці розщеплення різницевого
рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_z^- C^{n+1} = M_{zz}^+ C^n + M_{zz}^- C^{n+1}.$$

Невідоме значення концентрації C на кож-
ному кроці розщеплення розраховуємо за фор-
мулою біжного розрахунку, тобто розрахунок
здійснюємо за явною формулою. Це свідчить
про дуже просту програмну реалізацію кожного
різницевого рівняння.

Для побудови чисельної моделі на базі рів-
няння (2) попередньо приводимо його до ви-
гляду:

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

де t – фіктивний час.

Далі для чисельного інтегрування рівняння
(9) використовуємо метод Самарського. Під час
проведення розрахунків також використовуємо
метод Лібмана для чисельного інтегрування
рівняння (2).

Різницеві рівняння у випадку використання
методу Самарського для рівняння (9) мають
вигляд:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} +$$

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

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

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}.$$

Таким чином, під час використання методу Самарського чисельне розв'язання тривимірного рівняння (9) для визначення потенціалу швидкості здійснюємо за двома кроками. На першому знаходимо «проміжне» значення потенціалу $P_{i,j,k}^{n+1/2}$ на часовому шарі « $n+1/2$ », а на другому – «остаточне» значення потенціалу $P_{i,j,k}^{n+1}$ на часовому шарі « $n+1$ ».

У ході використання методу Лібмана виконуємо таку апроксимацію рівняння (2):

$$\frac{P_{i+1,j,k} - 2P_{i,j,k} + P_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k} - 2P_{i,j,k} + P_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1} - 2P_{i,j,k} + P_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} = 0.$$

Із цієї залежності величину $P_{i,j,k}$ визначаємо в середині кожної комірки за явною формулою.

Обидва методи (метод Самарського та метод Лібмана) використовуємо одночасно для контролю процедури розрахунку поля швидкості в споруді.

Після визначення поля потенціалу розраховуємо компоненти вектора швидкості потоку стічних вод:

$$\begin{aligned} u &= \frac{P_{i+1,j,k} - P_{i,j,k}}{\Delta x}; \\ v &= \frac{P_{i,j+1,k} - P_{i,j,k}}{\Delta y}; \\ w &= \frac{P_{i,j,k+1} - P_{i,j,k}}{\Delta z}. \end{aligned} \quad (10)$$

Алгоритм розв'язання задачі :

1. Розраховуємо поле потенціалу $P(x, y, k)$ у відстійнику (чисельне інтегрування рівняння (2)).

2. Визначаємо поле швидкості потоку стічних вод $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ (розрахунок на базі залежностей (10)).

3. Розраховуємо концентрацію домішки у відстійнику (чисельне інтегрування рівняння (1)).

На базі розробленої чисельної моделі була розроблена комп'ютерна програма «SETTLER-3D». Програмування виконано на алгоритмічній мові FORTRAN.

Результати

Нижче наведено результати розв'язання задачі з оцінки ефективності роботи відстійника. Розглянуто модельну задачу: розрахунок поля концентрації домішки у відстійнику, що має прямокутну форму, а на дні відстійника є два додаткових прямокутних елементи. Розрахунок здійснено за таких параметрів: $w_g = 0,001$ мм/с, висота додаткових елементів 1 м; розміри відстійника $20 \times 6 \times 4$ м. Візьмемо, що величина коефіцієнтів дифузії залежить від локальної швидкості потоку у відстійнику. Для цього використовуємо таку залежність $\mu_x = 0,1u$; $\mu_y = 0,1v$; $\mu_z = 0,1w$. На вході у відстійник взято, що концентрація домішки дорівнює $C = 100$ од. (у безрозмірному вигляді). Початкова умова: $C = 0$ у відстійнику за $t = 0$.

На рис. 1, 2 показано матрицю концентрації домішки у відстійнику в безрозмірному вигляді. Кожне число на рисунках показує у відсотках значення концентрації від максимальної концентрації в цьому перерізі. Друк чисел на матриці концентрації здійснено у форматі «INTENGER», тобто якщо концентрація в точці дорівнює 8,75 %, то друкується лише ціла частина – 8 %.

Як можна бачити з рис. 1, за кожним додатковим елементом, що розташований на дні відстійника, формується підзона з високим значенням концентрації домішки. Це пов'язано з тим, що додаткові елементи створюють локальну перешкоду на шляху руху стічних вод, яка зменшує швидкість потоку, що впливає на осадження домішки. Із рис.2 можна бачити, що біля вихідної межі відстійника створюється зона «освітлення». У цій зоні концентрація домішки перебуває в межах 6–8 %.

Відзначимо, що час розрахунку кожного сценарію становив 7 с.

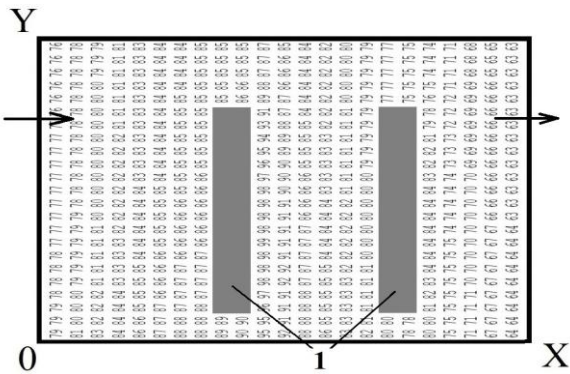


Рис. 1. Концентрація домішки у відстійнику, переріз $z = 0,5$ м:
I – додаткові елементи

Fig. 1. Concentration of impurities in the settling tank, cross section $z = 0,5$ m:
I – additional elements

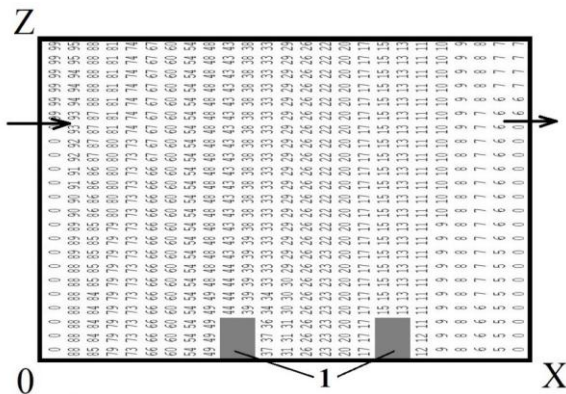


Рис. 2. Концентрація домішки у відстійнику, переріз $y = 3$ м:
I – додаткові елементи

Fig. 2. Concentration of impurity in the settling tank, section $y = 3$ m:
I – additional elements

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено ефективну 3DCFD-модель для оцінки ефективності роботи відстійника. Особливістю запропонованої чисельної моделі є можливість оцінювати роботу відстійника, що має складну геометричну форму.

Запропонована 3DCFD-модель дозволяє визначити поле концентрації домішки у відстійнику за декілька секунд. Ця чисельна модель може бути корисна під час проектування нових або реконструкції наявних відстійників. Побудована чисельна модель може бути також використана на першому етапі проектування відстійника під час проведення «пілотних розрахунків», коли швидко визначають необхідні для проектувальника дані. А далі, на другому етапі, можливе уточнення отриманих прогнозних даних за допомогою більш потужної моделі, наприклад, на базі рівнянь Нав'є–Стокса, пакет програм ANSYS.

Висновки

1. Запропоновано 3DCFD-модель для аналізу ефективності роботи відстійника. Модель дає можливість розраховувати гідродинаміку течії та масопереносу у відстійнику, що має додатковий елемент в середині споруди. Таким чином, 3DCFD-модель дозволяє здійснювати аналіз ефективності роботи споруди, що має складну геометричну форму.

2. У подальшому цей науковий напрям слід розвивати в галузі розробки CFD-моделі для аналізу ефективності роботи відстійника на базі рівнянь Нав'є–Стокса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения* : монографія. Днепропетровск : Новая идеология, 2012. 112 с.
2. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках* : монографія. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 115 с.
3. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення* : навч. посіб. Київ : ІВНВКП «УкрГеліотек», 2010. 272 с.
4. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A. Numerical determination of horizontal settlers performance. *Science and Transport Progress*. 2015. No. 4 (58). P. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/49201>
5. Dairi S., Khoualdia W., Mrad D., Bouamrane A., Djebbar Y., Abida H. Improving secondary settling tanks performance by applying CFD models for design and operation. *Water Supply*. 2023. Vol. 23. Iss. 6. P. 2313–2331. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2023.136>

6. Hirom K., Raees M. K., Tamphasana Devi T. CFD Study on Finding Optimum Number of Inclined Plates and Settling Efficiency in a Novel Sedimentation Tank (Lamella Clarifiers) of Wastewater Treatment Unit. *Fluid Mechanics and Fluid Power*. 2023. Vol. 1. P. 111–116. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-7055-9_19
7. Kruszyński W., Dawidowicz J. Computer modeling of water supply and sewerage networks as a tool in an integrated water and wastewater management system in municipal enterprises. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21. Iss. 2. P. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/117533>
8. Novikov A. E., Filimonov M. I., Dugin E., Golovanchikov A. B. Modeling a biological wastewater treatment system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 577. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/577/1/012010>
9. Rizaev A. Research methods of water purification from pollution with petroleum and petroleum products. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*. 2020. Vol. 24. Iss. 08. P. 5630–5634.
10. Švanda O., Pollert J. CFD modelling of a secondary settling tanks: generalization based on database relations. *Acta Polytechnica*. 2022. Vol. 62. Iss. 2. P. 313–321. DOI: <https://doi.org/10.14311/ap.2022.62.0313>
11. Szeląg B., Barbusiński, K., Studziński, J. Application of the model of sludge volume index forecasting to assess reliability and improvement of wastewater treatment plant operating conditions. *Desalination and Water Treatment*. 2019. Vol. 140. P. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23370>
12. Umarov U., Arifjanov A., Rizayev A., Umarova D. Mathematical modeling of wastewater treatment facilities of transport enterprises. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 401. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20234010301>

M. M. BILIAIEV¹, IU. V. BRAZALUK², P. S. KIRICHENKO³, P. B. MASHYKHINA^{4*},
A. S. KOVALENKO⁵

¹Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Dep. «Aerohydraulics and Energy and Mass Transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Gagarin Ave., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail brazaluk_jv@ukr.net, ORCID 0000-0001-6448-8525

³Dep. «Heat and gas supply, drainage and ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich str., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

^{4*}Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidro_eko@ukr.net, ORCID 0000-0003-3057-9204

⁵Dep. of «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0009-0009-9761-4300

Computer 3D Modeling of the Process of Wastewater Treatment in a Settling Tank

Purpose. Settling tanks are widely used in technological schemes of wastewater treatment. As a rule, horizontal settling tanks are used in practice. However, to increase the efficiency of water treatment in a horizontal settling tank, additional elements can be used, which are placed in different places in the structure. When reconstructing such structures or designing them for new facilities, it is necessary to assess the efficiency of the settling tanks under different operating conditions. To solve this problem, mathematical models play an important role, including conducting physical experiments, which requires considerable time to obtain results. In the case of mathematical modeling of the water treatment process in a sedimentation tank, two problems need to be solved: the hydrodynamic problem and the mass transfer problem. The main purpose of this paper is to develop a 3DCFD model for calculating the impurity concentration field in a sedimentation tank. **Methodology.** A dynamic multifactorial numerical model was developed for computer calculation of the wastewater treatment process in a settling tank. The hydrodynamics of the wastewater flow in the settling tank was calculated on the basis of a three-dimensional equation for the velocity potential (potential motion model). The calculation of the impurity concentration field in the settling tank was determined by numerical integration of the three-dimensional mass transfer equation. This equation takes into account the non-uniformity of the flow velocity field in the settling tank, the diffusion process, and the gravitational deposition of the impurity in the structure. The numerical integration of the modeled equations was carried out by using finite-difference splitting schemes. **Findings.** The software implementation of the constructed mathematical model was carried out. The results of a computational experiment to study the process of wastewater treatment in a settling tank

with visualization of the calculation results are presented. **Originality.** A multifactorial three-dimensional CFD model has been developed that allows to quickly assess the efficiency of the settling tank. **Practical value.** The proposed CFD model can be used in calculations in the design of wastewater treatment systems or to determine the efficiency of wastewater treatment under new operating conditions.

Key words: settling tank; water treatment; numerical modeling; computational experiment

REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya*: monografiya. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh*: monografiya. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkina, H. M., Polishchuk, O. V., & Prohulnyi, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiya i intensyfikatsiya sporud vodopostachannya ta vodovidvedennya*. Kyiv: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
4. Biliaiev, M. M., & Kozachyna, V. A. (2015). Numerical determination of horizontal settlers performance. *Science and Transport Progress*, 4(58), 34-43. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/49201> (in English)
5. Dairi, S., Khoualdia, W., Mrad, D., Bouamrane, A., Djebbar, Y., & Abida, H. (2023). Improving secondary settling tanks performance by applying CFD models for design and operation. *Water Supply*, 23(6), 2313-2331. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2023.136> (in English)
6. Hirom, K., Raesh, M. K., & Tamphasana Devi, T. (2023). CFD Study on Finding Optimum Number of Inclined Plates and Settling Efficiency in a Novel Sedimentation Tank (Lamella Clarifiers) of Wastewater Treatment Unit. In *Fluid Mechanics and Fluid Power* (Vol. 1, pp. 111-116). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-7055-9_19 (in English)
7. Kruszyński, W., & Dawidowicz, J. (2020). Computer Modeling of Water Supply and Sewerage Networks as a Tool in an Integrated Water and Wastewater Management System in Municipal Enterprises. *Journal of Ecological Engineering*, 21(2), 261-266. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/117533> (in English)
8. Novikov, A. E., Filimonov, M. I., Dugin, E., & Golovanchikov, A. B. (2020). Modeling a biological wastewater treatment system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 577, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/577/1/012010> (in English)
9. Rizaev, A. (2020). Research methods of water purification from pollution with petroleum and petroleum products. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 24(08), 5630-5634. (in English)
10. Švanda, O., & Pollert, J. (2022). CFD modelling of a secondary settling tanks: generalization based on database relations. *Acta Polytechnica*, 62(2), 313-321. DOI: <https://doi.org/10.14311/ap.2022.62.0313> (in English)
11. Szelağ, B., Barbusiński, K., & Studziński, J. (2019). Application of the model of sludge volume index forecasting to assess reliability and improvement of wastewater treatment plant operating conditions. *Desalination and Water Treatment*, 140, 143-154. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23370> (in English)
12. Umarov, U., Arifjanov, A., Rizayev, A., & Umarova, D. (2023). Mathematical modeling of wastewater treatment facilities of transport enterprises. *E3S Web of Conferences*, 401, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103031> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.08.2023

Прийнята до друку: 20.12.2023

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.016–048.34:[519.863:629.424]

Д. В. БОБИРЬ¹, Є. Б. БОДНАР², Д. М. КИСЛИЙ³, А. Є. ДЕСЯК^{4*}

¹Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 964 96 42, ел. пошта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

²Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 059 39 91, ел. пошта melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

³Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 625 18 59, ел. пошта dmitriykisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

^{4*}Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 949 41 95, ел. пошта andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

Визначення параметрів обмеження поздовжнього прискорення для оптимізації витрат енергоресурсів на тягу поїздів

Мета. Основною метою статті є вдосконалення тягових розрахунків з використанням математичного моделювання під час розв'язання рівняння руху поїзда. Модель поїзда адаптовано для оптимізації параметрів руху поїздів під час набору швидкості з визначенням функціональних взаємозв'язків потужності силової енергетичної установки локомотива й профілю ділянки колії з витратою енергоресурсів локомотивом. **Методика.** Для розв'язання поставлених задач використано сучасні методи математичного моделювання. Моделювання роботи силової енергетичної установки виконано із застосуванням методів інтерполяції та апроксимації. Під час створення моделі електричної частини передачі тепловоза використано метод імітаційного моделювання. Для розрахунку параметрів та характеру руху поїзда використано метод інтегрування диференціального рівняння руху та розв'язано задачу, яка полягає в знаходженні розв'язку цього рівняння на протяжності тягової ділянки з урахуванням варіативних значень потужності локомотива та ухилів профілю колії. **Результати.** Для аналізу результатів тягових розрахунків отримано такі показники, як технічна швидкість і витрата дизельного палива, а також виконано порівняння цих показників. Результати свідчать, що в разі обмеження прискорення спостерігається зниження витрати дизельного палива за майже незмінної технічної швидкості. **Наукова новизна.** Набуло подальшого розвитку підвищення енергоефективності ведення поїздів, а саме отримано функціональну залежність відносної потужності силової енергетичної установки локомотива, яка враховує дійсний профіль ділянки, що дає змогу визначати енергоощадні режими керування локомотивом та зменшити витрату енергоресурсів, навантаження на дизель та елементи тягової передачі тепловоза під час перехідних режимів, що, у свою чергу, крім економії дизельного палива, вплине на надійність елементів силової установки. **Практична значимість** полягає в економії дизельного палива в режимах руху, які забезпечують набір швидкості та підвищення надійності силової установки за рахунок зменшеного навантаження.

Ключові слова: тяга поїздів; тепловоз; техніко-економічна ефективність; математична модель; рівняння руху поїзда; енергоощадність

Вступ

Нині енергетика є одним із найважливіших секторів економіки України. При цьому залізничний транспорт – стабільний споживач широкої номенклатури ресурсів паливно-енергетичного комплексу нашої країни. Праг-

нення підвищити рівень розвитку в технологічному та енергетичному плані викликає необхідність раціоналізації використання виробничих потужностей, визначення оптимального обсягу споживання енергоресурсів, розробки та впровадження програми з підвищення ефективності використання енергоресурсів та пали-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ва, забезпечення максимально можливої кореляції між усіма елементами системи підвищення енергоефективності країни. Роботи за цими напрямками вже проводять, результати відображено в численних публікаціях вітчизняних науковців. Серед них – обґрунтування питань, пов'язаних із визначення необхідної потужності для залізничних перевезень [16], раціоналізація логістичних процесів [15], удосконалення системи управління локомотивним парком [17], розробка раціональних методів організації експлуатації та ремонту тягового рухомого складу [10, 12, 13, 18], аналіз стану безпеки руху тягового рухомого складу [11].

Предметом вивчення тяги поїздів є основні зовнішні сили, що діють у горизонтальній площині на поїзд під час руху, а саме: сили тяги локомотива, сили опору руху та гальмівні сили.

Сила тяги локомотива F_d – це керована машиністом зовнішня сила, яка створюється локомотивними силовими енергетичними установками із взаємодією коліс із рейками і яка спрямована в напрямку руху. Розглядають природу виникнення і специфіку дії сили тяги різних типів та серій локомотивів, процес утворення та реалізації, обмеження сили тяги за потужністю локомотивів і за умовою контакту (зчеплення) коліс з рейками (обмеження сили тяги за зчепленням). Останнє обмеження, яке має найбільше значення для залізничного транспорту, часто називають основним законом локомотивної тяги.

Сили опору руху рухомого складу спрямовані за напрямком, що протилежний напрямку руху поїзда, та створюють значну перешкоду йому. Вони є некерованими і взагалі не залежать від дій машиніста, у наземному транспорті мають двояку природу.

Значення складових сил основного опору W_0 визначають та описують у тягових розрахунках їх загальною сумою, величину якої в розрахункових формулах беруть залежно від типу рухомого складу, швидкості руху та осьових навантажень. Зі збільшенням швидкості руху сили основного опору суттєво зростають.

Другий компонент сил опору руху в наземному, у тому числі й рейковому транспорті – це додатковий опір. Він тісно пов'язаний із планом та поздовжнім профілем залізничної колії. Реальний шлях суттєво відрізняється від умовного, горизонтального і прямолінійного, якому

на елементі профілю відповідає основний опір руху, наявністю на конкретних ділянках ухилів різної крутизни (підйомів і спусків) та криволінійних ділянок колії, які характеризуються радіусом кривизни та протяжністю. Сили додаткового опору руху, що діють на поїзд на підйомах великої крутизни, значно перевищують величину основного опору. Отже, величина ухилу служить головним параметром для встановлення можливої маси складу.

Гальмівні сили B_r – це штучні, керовані машиністом сили, що спрямовані в протилежний руху поїзда бік. Вони служать для керування рухом із дотриманням його безпеки. Величина гальмівних сил істотно залежить від типів та конструктивних рішень поїзних гальмівних систем рухомого складу. Найбільш поширеними гальмівними системами є системи фрикційного типу, де гальмівна сила створюється за рахунок тертя ковзання між колесом (чи спеціальним диском, що встановлений на осі колісної пари) та гальмівними колодками. Величина цієї гальмівної сили залежить від сили натискання на гальмівну колодку, притиснену до колеса (диска), помноженої на коефіцієнт тертя між ними, який, у свою чергу, залежить від матеріалів поверхонь, що контактують, і швидкості їх переміщення відносно один одного. Величина цього коефіцієнта зменшується в разі збільшення швидкості руху поїзда [1, 7].

Мета

Основною метою статті є вдосконалення тягових розрахунків із використанням математичного моделювання під час розв'язання рівняння руху поїзда. Модель поїзда адаптовано для оптимізації параметрів руху поїздів під час набору швидкості з визначенням функціональних взаємозв'язків потужності силової енергетичної установки локомотива й профілю ділянки колії з витратою енергоресурсів локомотивом.

Методика

Під час виконання тягових розрахунків використовують сукупність методів для встановлення сил, що діють на поїзд, сукупність способів розв'язання рівняння руху поїзда в конкретних та загальних умовах, узятих за розрахункові, нормативних фактичних даних та

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

відомостей про характеристики різних типів тягового та нетягового рухомого складу.

Основною проблемою проведення вимірювань параметрів у випадку випробувань локомотивів під час руху є необхідність підтримання сталого руху поїзда, тобто збереження незмінними сил, які діють на локомотив і склад вагонів, що важко забезпечити на реальних лініях.

Якщо серед сил, які визначають рухливість системи, є хоча б одна сила (чи декілька), яка залежить від швидкості, то виконувати розрахунки руху за допомогою загальних теорем класичної механіки не можна, оскільки такі сили цілком проявляються лише в процесі руху впливають на кінематичні характеристики руху та нелінійно залежать від них. Такі задачі можна розв'язати лише методом інтегрування диференціального рівняння руху [5, 7, 8].

Усі основні сили, які визначають рух поїзда, (F_d , W_o , B_r), представлені як залежність від швидкості. Крім того, на поїзд, що рухається, діють ще додаткові сили опору від ухилів і кривизни колії, які також суттєво впливають на швидкість руху поїзда, ступінь їх впливу залежить від поєднання самих елементів профілю та їх протяжності.

Отже, розрахунок руху поїзда виконуємо методом інтегрування диференціального рівняння руху:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta \cdot (f_k - w_k - b_r). \quad (1)$$

Задача полягає в тому, щоб знайти розв'язок цього рівняння на всій протяжності тягової ділянки за заданої маси складу, серії локомотива, профілю колії та діаграми питомих рівнодіючих на поїзд сил.

Шляхом деяких перетворень отримаємо:

$$ds = \frac{v dv}{\zeta f_y}. \quad (2)$$

Рівняння (2) вирішується інтегруванням:

$$\int ds = \int \frac{v dv}{\zeta f_y}. \quad (3)$$

На стан поїзда накладені обмеження за силою зчеплення коліс із рейками, за потужністю і надійністю локомотива, за безпекою руху

поїздів та інші види обмежень [3, 4]. Під час вибору кроку інтегрування потрібно виконувати умову забезпечення таких фазових координат стану поїзда в кінці кроку, які б не виходили за межі нормативних та гранично допустимих параметрів і забезпечували оптимальне розв'язання задачі перевезень, що, у свою чергу, викликає необхідність дотримання прийнятого у тязі поїздів принципу максимуму та відповідає оптимальності сили тяги. Крім того, опір руху, а отже, і швидкість буде змінюватися на переломах елементів профілю, і якщо під час інтегрування обрати інтервал, який охоплює елементи профілю, що не можна спрямити та різної крутизни, то це внесе похибку в разі визначення рівнодіючої сили. Принцип максимуму та обмеження параметрів руху поїзда має важливе значення для роботи всієї системи транспорту. Неправильне застосування та недотримання принципу мінімуму часто є причиною неповного використання потенційних можливостей тяги локомотива або виникнення несправностей, значно більших витрат енергоресурсів та збою графіка руху поїздів. Установлено два основні фундаментальні підходи задачі оптимального керування:

– ефективність керування процесом виражається критерієм оптимальності, значення якого дозволяє знайти переважне рішення;

– встановлені значення критерію оптимальності повинні бути обмеженими.

Для початку розглянемо задачу оптимізації. Критерій оптимальності – це показник, числове значення якого визначає гранично досяжну міру ефективності процесу. За такі критерії можуть бути взяті [8]:

– найвища продуктивність;

– найбільший коефіцієнт корисної дії (к.к.д.);

– найменша собівартість перевезень та ін.

Одночасне вираження ефективності декількома критеріями оптимальності може призводити до задачі, яку не можливо розв'язати навіть за допомогою алгоритмів на ЕОМ, тому необхідно обрати один головний критерій [7].

Обираючи головний критерій оптимальності, слід дотримуватися принципів системного підходу з призначення і мети функціонування всієї системи. Формальним виразом має бути цільова функція системи у вигляді критерію оптимальності. Цільовою функцією транспорту

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

є повне задоволення потреб народного господарства в перевезеннях, отже, оптимальним та раціональним рухом поїздів слід вважати такий рух, за якого буде досягтися найбільша провізна та пропускна спроможність залізниці в цілому. Це можливо в разі водіння поїздів найбільшої маси, із найбільшою допустимою швидкістю і з найбільшим використанням кінетичної енергії поїздів на спусках та підйомах. Цей принцип розрахунку руху поїзда офіційно затверджений у «Правилах тягових розрахунків», його називають принципом максимуму. Реалізація цього принципу не тільки підвищує ефективність локомотивної тяги, але і слугує одним зі спрощених допущень під час побудови, розрахунку і дослідження моделі поїзда.

Інші наявні показники ефективності, зокрема приведена собівартість витрат енергоресурсів і т. д., не завжди збігаються із загальним критерієм оптимальності. У такому випадку в пріоритеті буде головний критерій, а решта критеріїв будуть знаходитися в межах своїх параметричних характеристик. Тому ці критерії оптимальності називають локальними критеріями. Залежно від мети дослідження локальні критерії можуть бути взяті як обмежувальні умови [6, 9].

Розглянемо задачу обмежувальних станів поїзда. Припустимо, що поїзд рухається під дією змінних зовнішніх впливів, що обумовлені перевалистим профілем, сигналами, організацією і технологією перевізного процесу та ін. Тому він, як і будь-яка керована система, має мати здатність до переходу з одного стану в інший, щоб швидко адаптуватися до зміни зовнішніх впливів, але не повинен приймати будь-які інші стани. Будь-який процес збалансованих та організованих систем завжди розвивається в рамках деяких обмежень. Сенс цих обмежень полягає в тому, що кількісне значення того чи іншого параметра, що визначає стан системи (наприклад, поїзда), не може виходити за межу можливого чи допустимого параметра. Такими параметрами є чи можуть бути як керівні дії (сила тяги, гальмівна сила та миттєві значення струму), так і фазові координати поїзда (швидкість та положення на перегоні) [2, 5].

Межі допустимого обумовлюються та визначаються тим, що стан поїзда взагалі може вийти за рамки встановлених обмежень, проте

не повинен виходити за рамки, встановлені умовами безпеки, надійності, стійкості чи технології перевізного процесу. Такі обмеження встановлено нормативними документами, нормативами заводів-виробників тягового та не тягового рухомого складу, графіком руху поїздів та правилами технічної експлуатації (ПТЕ).

Межі можуть бути обумовлені природними причинами та умовами, коли параметри стану поїзда не в змозі набувати відповідних значень, перевищують нормативні, зокрема це обмеження сили тяги за дизелем, тяговою передачею і зчепленням для тепловоза. У звичайному режимі ці сили взаємопов'язані, а в разі відмінних режимів руху відбувається розузгодження через те, що закономірності їх зміни мають різну фізичну природу. Очевидно, тільки найменша з цих сил може бути реалізована, і тому вона в результаті стає головним обмеженням [8, 9].

Обмеження, які беруть у тязі поїздів, класифікують за такими ознаками [1]:

– обмеження за ресурсом: потужність генератора, дизеля; потужність передачі, обумовлена зовнішньою характеристикою тягового генератора тепловоза; сила зчеплення коліс із рейками; кількість гальмівних осей поїзда та силу зчеплення цих коліс із рейками визначають навантаженням колісних пар на рейки;

– обмеження за надійністю роботи та безпекою руху: максимально допустиму швидкість руху визначають конструкцією рухомого складу та колії; максимально допустиму силу тяги локомотива за кратної тяги і в разі зрушення з місця поїзда визначають міцністю автотчепів та хребтових балок вагонів; найбільшу силу штовхання чи електричного гальмування визначають стійкістю рухомого складу від витискання в кривих ділянках колії; найбільші значення струму тягових електродвигунів, найбільшу допустиму температуру перегріву обмоток тягових електричних машин (електродвигунів та генераторів) визначають класом ізоляції; знімання струму з колектора тягових двигунів постійного струму обумовлене потенційними умовами комутації;

– обмеження, що залежать від умов експлуатації та організації руху: обмеження за нормою маси поїздів, обмеження за довжиною приймально-відправних колій станцій чи за

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

нормами уніфікації маршрутних поїздів; зниження швидкості руху в разі ущільнення потоку поїздів або за станом колії, за погодними умовами та ін.

Постає завдання дослідження ефективності сили тяги за наявності декількох обмежень. Керування на межі конкретного обмеження часто є екстремальним, проте не всяке керування на межі може бути оптимальним у випадку реалізації функції мети. Отже, вибір оптимального режиму керування полягатиме у виборі якнайкращого режиму з числа екстремальних.

Наприклад, тепловоз під час ведення поїзда може працювати в режимах обмежень потужності за дизелем, або за зчепленням колеса і рейки, або за перегрівом обмоток тягових електричних машин. Керування тепловозом на межі будь-якого з обмежень є завжди екстремальним. Оптимальним же обмеженням буде таке з числа дослідних, за якого досягається найбільша провізна здатність ділянки колії.

Щодо обмежень, які встановлені нормами, явною є деяка свобода вибору керівних дій, а принцип максимуму є лише необхідною умовою оптимальності.

Розв'язок рівняння руху поїзда дає можливість передбачити його рух, що є головним завданням теорії тяги поїздів, без вирішення якого неможливе правильне функціонування всієї залізниці в цілому. Для досягнення цієї мети будь-який метод розв'язання рівняння руху поїзда повинен бути доведений до числового результату. Методика таких розв'язань представлена далі на різних прикладах, що прийняті в практиці тягових розрахунків.

З урахуванням вищевикладеного за головний критерій оптимальності обираємо дотримання поздовжнього горизонтального прискорення, яке знаходиться в межах $0,4 \text{ м/с}^2$ [3, 4].

Відповідно до поставленої мети обираємо для розрахунків локомотив серії ТЕП70 (дві секції) як один із найпотужніших та з найбільшою конструктивною швидкістю тепловозів в експлуатаційному парку Укрзалізниці.

Вихідні дані для тягового розрахунку: серія локомотива – ТЕП70 (дві секції); маса локомотива – 270 т, розрахункова швидкість – 48,3 км/год; сила тяги під час зрушення з місця – 577 кН, маса складу – 645 т.

Для побудови діаграми питомих рівнодіючих сил (рис. 1) попередньо складемо таблицю

з даними для трьох режимів ведення поїзда по горизонтальній прямій ділянці колії:

а) для режиму тяги:

$$f_d - \omega_0 = f_1(V); \quad (4)$$

б) для режиму холостого ходу:

$$\omega_{0x} = f_2(V); \quad (5)$$

в) для режиму гальмування:

– у разі службового регулювального гальмування:

$$\omega_{0x} + 0,5b_r = f_3(V); \quad (6)$$

– у разі екстреного гальмування:

$$\omega_{0x} + b_r = f_4(V), \quad (7)$$

де V – швидкість поїзда, км/год.

Основний питомий опір складу під час руху поїзда по прямій горизонтальній безстиківій ділянці колії на холостому ході розраховуємо за формулою, у Н/кН:

$$\omega_x = 2,4 + 0,011 \cdot V + 0,00035 \cdot V^2. \quad (8)$$

Основний питомий опір складу під час руху поїзда по прямій горизонтальній безстиківій ділянці колії в режимі тяги розраховуємо за формулою, Н/кН:

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot V + 0,0003 \cdot V^2. \quad (9)$$

Розрахункові формули для основних питомих опорів складу були обрані згідно з даними, наведеними в [1].

Величини ω'_0 , ω_x визначаємо за вищевказаним методом для ряду швидкостей від 10 км/год і до конструкційної.

Питомі гальмівні сили поїзда в Н/кН розраховуємо за формулою:

$$b_r = 1000 \cdot \varphi_{кр} \cdot \vartheta_p, \quad (10)$$

де $\varphi_{кр}$ – розрахунковий коефіцієнт тертя гальмівних колодок об колесо;

ϑ_p – розрахунковий гальмівний коефіцієнт поїзда.

Розрахунки проводимо в пакеті символьних обчислень, а результати розрахунків діаграми питомих рівнодіючих сил наводимо на рис. 1.

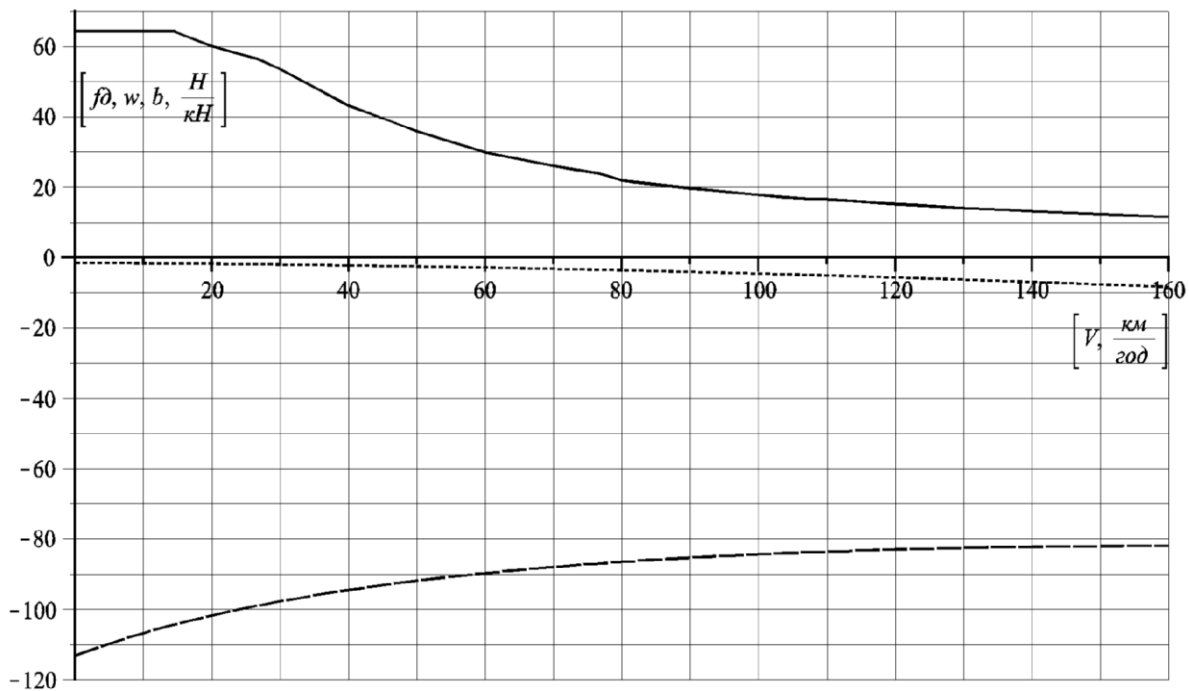


Рис. 1. Діаграма питомих рівнодіючих сил
(локомотив 2ТЕП70, маса складу 645 т)

Fig. 1. Diagram of specific equivalent forces
(locomotive 2TEP70, train weight 645 t)

Перед початком побудови кривих швидкості і часу ходу поїзда по ділянці потрібно розв'язати гальмівну задачу, тобто встановити максимально допустиму швидкість руху поїзда по найкрутішому елементі профілю (спуску) ділянки з визначеними гальмівними засобами та прийнятому гальмівному шляху для цієї ділянки. Цю задачу розв'язуємо графічним способом. Розрахунки та побудову даних кривих виконуємо відповідно до [1].

Повний гальмівний шлях (розрахунковий) визначаємо як суму підготовчого та дійсного гальмівного шляху, м:

$$S_{\Gamma} = S_{\Pi} + S_{\text{д}}, \quad (11)$$

де S_{Π} – шлях підготовки гальм до дії, на якому гальма поїзда умовно беруть недіючими, м; $S_{\text{д}}$ – дійсний гальмівний шлях, на якому поїзд рухається з гальмами, що працюють на повну силу (повне службове або екстрене гальмування), м.

Рівняння (11) дає можливість знайти допустиму швидкість руху як величину, яка

відповідає точці перетину графічних залежностей підготовчого шляху S_{Π} і дійсного гальмівного шляху $S_{\text{д}}$ від швидкості руху поїзда в режимі гальмування.

Залежність підготовчого гальмівного шляху від швидкості:

$$S_{\Pi} = 0,278 \cdot V_{\text{поч}} \cdot t_{\Pi}, \quad (12)$$

де $V_{\text{поч}}$ – швидкість на початку гальмування, км/год; t_{Π} – час підготовки гальм до дії, с.

У нашому випадку згідно з [12]:

$$t_{\Pi} = 2 - \frac{3 \cdot i_{\Gamma}}{b_{\Gamma}}, \quad (13)$$

де i_{Γ} – крутизна ухилу, для якого розв'язують гальмівну задачу, %; b_{Γ} – питома гальмівна сила за початкової швидкості гальмування $V_{\text{поч}}$, Н/кН.

В автоматизованому варіанті розв'язання гальмівної задачі (фрагмент програми наведено на рис. 2) має вигляд [9].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

```

while t ≤ nuch do Sd := 0 : Vn := 0 :
  if iut > -6 then Sdop := 1000 :
    else Sdop := 1200 : end if :
  while (Spodg + Sd) ≤ Sdop do
    Vn := Vn + dV : Vs :=  $\frac{Vn + Vk}{2}$  :
    Sd := Sd +  $\frac{500 \cdot (Vk^2 - Vn^2)}{\text{zeta} \cdot (\text{subs}(v = Vs, \text{wxbt}) + iuch_t)}$  :
    tp : Spodg := 0.278 · Vk · tp :
    Vn := Vk : od :
    Vmaxt := Vk - 1 : t := t + 1 : od :

```

Рис. 2. Фрагмент програми для розв'язання гальмівної задачі

Fig. 2. A fragment of the program for solving the braking problem

Результатом розв'язку є аналітична залежність допустимих швидкостей від шляху.

Під час побудови кривої $V = f(S)$ слід врахувати обмеження за найбільшою допустимою швидкістю руху поїзда:

- найбільша допустима швидкість поїзда за умови міцності колії – 160 км/год;
- конструкційна швидкість тепловоза – 160 км/год;
- найбільша допустима швидкість руху під час розв'язання гальмівної задачі на керівному ухилу >160 км/год;
- обмеження швидкості руху поїзда допустимими величинами прискорювальних та сповільнюваних сил.

Максимально допустиму швидкість руху поїзда під час побудови кривої $V = f(S)$ потрібно обирати найменшою з усіх перелічених вище можливих обмежень швидкостей.

Витрати дизельного палива тепловозом на заданій ділянці визначають за формулою, кг:

$$E = Gt_T + g_x t_x, \quad (14)$$

де G – витрата дизельного палива тепловозом у режимі тяги, що відповідає 15-й позиції ручки контролера машиніста, кг/хв; t_T – сумарний час

роботи тепловоза в режимі тяги, хв; g_x – витрата дизельного палива тепловозом за вимкненого струму (в режимі холостого ходу та гальмування), кг/хв; t_x – сумарний час роботи тепловоза в режимі холостого ходу і режимі гальмування, хв.

Розрахунки витрати палива на математичній моделі дозволяють визначати витрату на кожному циклічному розв'язанні рівняння руху поїзда.

Питома витрата пального на вимірювач, кг/10⁴ ткм:

$$e = \frac{E}{Q \cdot L} 10^4. \quad (15)$$

Для розрахунку параметрів обмеження за прискоренням у разі набору швидкості поїздом необхідно виконати побудову масиву траєкторій руху поїзда (рис. 3, а) для різних величин ухилів (рис. 3, б).

Для обмеження сил прискорення необхідно постійно коригувати величину сили тяги локомотива. Щоб визначити прискорення виконуємо оптимізаційні розрахунки з урахуванням коригування сили тяги локомотива шляхом множення усіх значень тягової характеристики на певний додатковий коефіцієнт

$$k_t \in [0,1] \quad (16)$$

до того моменту, коли будуть задоволені умови за прискоренням $a \leq 0,4 \text{ м/с}^2$ [3]. Притому прискорення в м/с^2 визначаємо за наступною формулою:

$$a = \frac{1000 \cdot V}{3600 \cdot 60 \cdot t}. \quad (17)$$

Оскільки побудову кривих швидкості руху розраховано до значення швидкості 60 км/год, то формулу для визначення прискорення можна значно спростити:

$$a = \frac{1000 \cdot 60}{3600 \cdot 60 \cdot t} = \frac{0,278}{t}. \quad (18)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

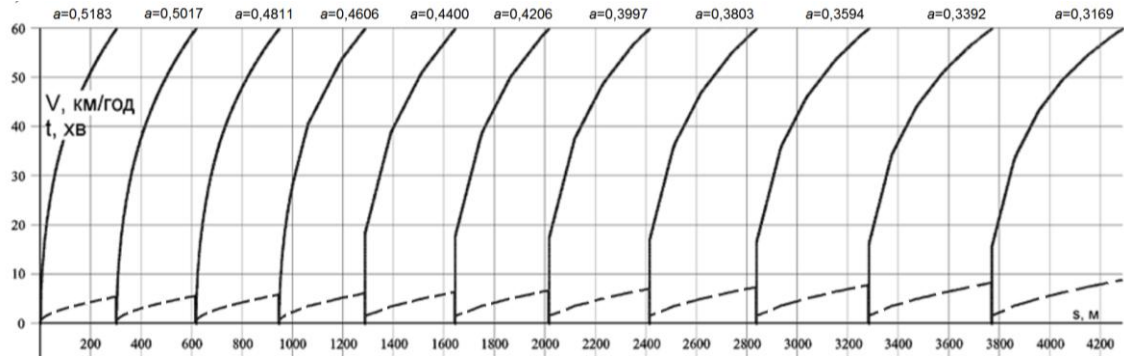
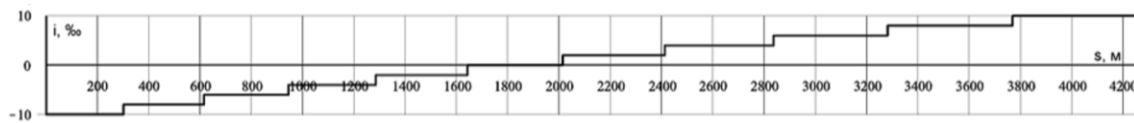
a – a*б – б*

Рис. 3. Криві швидкості руху та часу з відповідними значеннями прискорення поїзда (а) на відповідних ухилах профілю колії (б)

Fig. 3. Curves of speed and time with corresponding values of train acceleration (a) on the corresponding slopes of the track profile (b)

Отже, визначено такі параметри:

за величини ухилу $i = -10 ‰$ значення коефіцієнта коригування сили тяги локомотива становить $k_t = 0,73$;

за величини ухилу $i = +2 ‰$ значення коефіцієнта коригування сили тяги локомотива становить $k_t = 1$.

Проміжні значення коефіцієнта коригування сили тяги k_t вказувати недоцільно, оскільки він має лінійну залежність та описується рівнянням:

$$k_t = \begin{cases} i < 2, & 0,0955 + 0,0225 \cdot i; \\ i \geq 2, & 1 \end{cases}, \quad (19)$$

а також графічну залежність (рис. 4).

З урахуванням коефіцієнта коригування сили тяги k_t виконуємо побудову траєкторій руху поїзда (рис. 5, а) відповідно до ухилів (рис. 5, б).

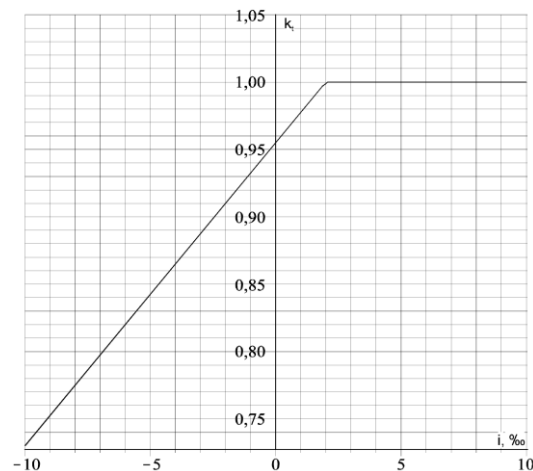


Рис. 4. Залежність коефіцієнта коригування сили тяги k_t від значення ухилу профілю колії i

Fig. 4. Dependence of the traction force correction factor k_t on the value of the track profile slope i

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

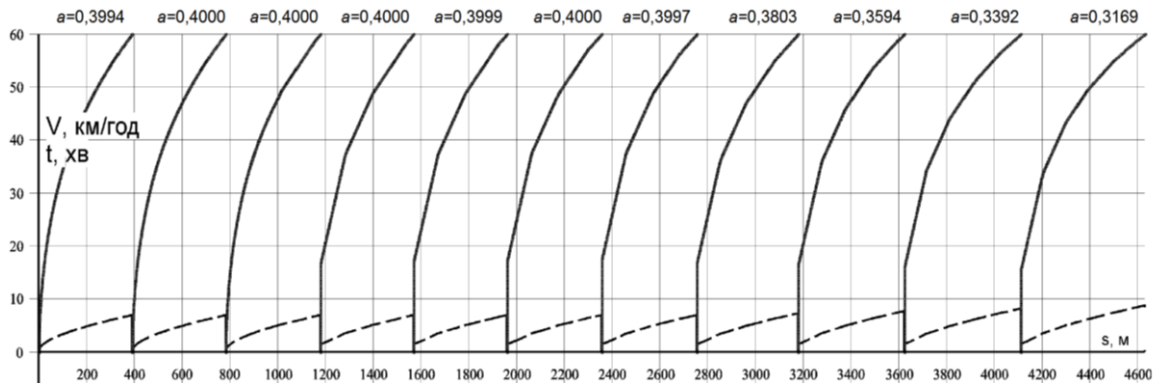
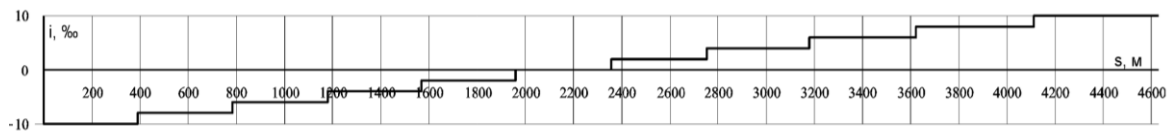
a – a*b – b*

Рис. 5. Криві швидкості руху та часу з відповідними значеннями прискорення поїзда (*a*) на відповідних ухилах профілю колії (*b*)

Fig. 5. Curves of speed and time with corresponding values of train acceleration (*a*) on the corresponding slopes of the track profile (*b*)

Результати

З метою аналізу результатів розрахунків пропонуємо порівняти отримані показники, такі як технічна швидкість і витрата дизельного палива.

Технічну швидкість руху поїзда по ділянці визначаємо за формулою, км/год:

$$V_T = \frac{L \cdot 60}{\sum t_i}, \quad (20)$$

де t_i – відповідно час ходу поїзда по всіх перегонах на заданій ділянці, без обмеження прискорення $\sum t_i = 7,719$ хв; у разі обмеження прискорення $\sum t_i = 8,303$ хв; L – довжина ділянки, без обмеження за прискоренням $L = 4,289$ км; з обмеженням за прискоренням $L = 4,631$ км.

Підставивши значення, отримаємо:

$$V_T = \frac{4,289 \cdot 60}{7,719} = 33,3 \text{ км/год};$$

$$V_T^{np} = \frac{4,631 \cdot 60}{8,303} = 33,5 \text{ км/год}.$$

Різницю знаходимо за формулою:

$$\delta_V = \left| \frac{V_T - V_T^{np}}{V_T} \right| \cdot 100; \quad (21)$$

$$\delta_V = \left| \frac{33,3 - 33,5}{33,3} \right| \cdot 100 = 0,6 \%.$$

Щодо витрати дизельного палива на ділянці маємо такі показники:

– без обмеження за прискоренням $q = 160,4$ кг;

– з обмеженням за прискоренням $q^{np} = 153,7$ кг.

Підставивши ці значення, отримаємо:

$$\delta_q = \left| \frac{160,4 - 153,7}{160,4} \right| \cdot 100 = 4,17 \%.$$

Отже, у випадку обмеженого прискорення спостерігається зниження витрати дизельного палива в межах 4 % за майже незмінної технічної швидкості на ділянці.

Наукова новизна та практична значимість

Набуло подальшого розвитку підвищення енергоефективності ведення поїздів, а саме отримано функціональну залежність відносної потужності силової енергетичної установки локомотива, яка враховує дійсний профіль ділянки, що дає змогу визначати енергоощадні режими керування локомотивом та зменшити витрату енергоресурсів, навантаження на дизель та елементи тягової передачі тепловоза під час перехідних режимів, що, у свою чергу, крім економії дизельного палива, вплине на надійність елементів силової установки.

Висновки

Щоб удосконалити тягові розрахунки з використанням математичного моделювання під час розв'язання рівняння руху поїзда, модель поїзда адаптовано для оптимізації параметрів руху поїздів під час набору швидкості. У ході огляду факторів безпеки руху визначено раціональне значення прискорення та відповідні аналітичні залежності для керування рухомих складом.

За результатами розрахунків та їх порівняння можна стверджувати, що в разі обмеженого прискорення технічна швидкість майже не змінюється, проте витрата дизельного палива зменшується до 4 % під час набору швидкості поїздом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги* : підручник. Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2022. 385 с.
2. Боднар Б. Є., Капіца М. І., Кислий Д. М. Визначення сили тяги локомотива з урахуванням нерівномірності навантаження колісно-моторних блоків. *Наука та прогрес транспорту*. 2013. № 6 (48). С. 63–71.
3. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобирь Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина* : підручник. Дніпропетровськ : Ліра ЛТД, 2009. 284 с.
4. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобирь Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування* : підручник для ВНЗ залізничного транспорту. Дніпропетровськ : ПП «Ліра ЛТД», 2010. 358 с.
5. Боднар Б. Є., Капіца М. І., Афанасов А. М., Кислий Д. М. Визначення енергоощаджуючих режимів розгону поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 5 (59). С. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359>
6. Боднар Б. Є., Капіца М. І., Боднар Є. Б., Очкасов О. Б. *Експлуатація локомотивів та локомотивне господарство. Організація ремонтного та екіпірувального господарства* : підручник. Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2022. 220 с.
7. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : монографія: в 2 т. Дніпропетровськ : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. Т. 1. 450 с.
8. Капіца М. І., Кислий Д. М. Визначення тривалості вибігу локомотива при переході з режиму тяги в режим гальмування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2013. Вип. 136. С. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.136.2013.107716>
9. Кислий Д. М. Визначення енергоощаджуючих режимів ведення поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
10. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Bodnar E. B., Hryshechkina T. S., Ocheretnyuk M. V. Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress*. 2018. No 5 (77). P. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147740>
11. Bodnar B., Bolzhelarskyi Y., Ochkasov O., Hryshechkina T., Cerniauskaite L. Determination of integrated indicator for analysis of the traffic safety condition for traction rolling stock. *The 12th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)* (Panevėžys, 26–27 Apr. 2018). Panevėžys, 2018. P. 45–54.
12. Bodnar B., Ochkasov A., Bobyr D. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir menas*. 2016. № 7. P. 109–114.
13. Bodnar B., Ochkasov O. System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems. *Transport Means: Proceedings of 21st International Scientific Conference* (Juodkrante, 20–22 Sept. 2017). Kaunas University of Technology Klaipėda University. Juodkrante, 2017. P. 43–47.
14. Kapitsa M. I., Martyshchynskyi M. I., Kyslyi D. N., Pali I. I. Technical and energy parameters improvement of diesel locomotives through the introduction of automated control systems of a diesel. *Science and Transport Progress*. 2015. № 3 (57). P. 176–185. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46077>

15. Kozachenko D., Bobrovsky V., Ochkasov O., Shepotenko A., Hermaniuk Y. Adaptation of Ukrainian Grain Elevators for Unit Train Loading. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : The 12th International Scientific Conference* (Panevėžys, 27–28 Apr. 2018). Kaunas University of Technology. Panevėžys, 2018. P. 125–133.
16. Kozachenko D., Dovbnia M., Ochkasov O., Serdiuk V., Shepotenko A., Keršys A. Rationale for Choosing the Type of Traction Rolling Stock for the Enterprise of Industrial Transport. *Transport Means 2018 : Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf.* (Trakai, 03–05 Oct. 2018). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai»). Kaunas, 2018. Pt. II. P. 991–995.
17. Ochkasov O., Ocheretniuk M., Skvireckas R. Approaches to the Improving the Locomotive Fleet Management System. *Transport Means 2021 : Proceedings of the 25th International Conference* (Kaunas, 06–08 Oct. 2021). Kaunas University of Technology. Kaunas, 2021. Pt. III. P. 1054–1058.
18. Ochkasov O., Shvets O., Černiauskaitė L. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir menas*. 2017. № 8. P. 68–71.

D. V. BOBYR¹, E. B. BODNAR², D. M. KISLIY³, A. Y. DESIAK^{4*}

¹Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 964 96 42, e-mail dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

²Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 059 39 91, e-mail melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

³Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (066) 625 18 59, e-mail dmitriykisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

^{4*}Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (063) 949 41 95, e-mail andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

Determination of Parameters for Limiting Longitudinal Acceleration to Optimize Energy Consumption for Train Traction

Purpose. The main purpose of the article is to improve traction calculations using mathematical modeling when solving the equation of train motion. The train model is adapted to optimize the parameters of train movement during speed gain with the determination of functional relationships between the power of the locomotive power plant and the profile of the track section with the consumption of energy resources by the locomotive. **Methodology.** Modern methods of mathematical modeling were used to solve the tasks. The modeling of the power plant operation was performed using interpolation and approximation methods. The simulation modeling method was used to create a model of the electrical part of the diesel locomotive transmission. The method of integrating the differential equation of motion was used to calculate the parameters and nature of the train's movement and the problem was solved, which consists in finding a solution to this equation over the length of the traction section, taking into account the variable values of the locomotive power and the slopes of the track profile. **Findings.** To analyze the results of traction calculations, we obtained such indicators as technical speed and diesel fuel consumption, and compared these indicators. The results show that in the case of acceleration limitation, there is a decrease in diesel fuel consumption at almost unchanged technical speed. **Originality.** The improvement of energy efficiency of train operation has been further developed, namely, the functional dependence of the relative power of the locomotive power plant, which takes into account the actual profile of the site, has been obtained, which makes it possible to determine energy-saving modes of locomotive control and reduce energy consumption, load on the diesel engine and elements of the diesel locomotive traction transmission during transient modes, which, in turn, in addition to saving diesel fuel, will affect the reliability of the power plant elements. **The practical value** of the study is to save diesel fuel in the modes of movement that provide speed gain and increase the reliability of the power plant due to reduced load.

Keywords: train traction; diesel locomotive; technical and economic efficiency; mathematical model; equation of train motion; energy saving

REFERENCES

1. Bobyr, D. V., Hryshchenko, M. A., & Serdyuk, V. N. (2022). *Teoriya lokomotyvnoyi tyahy*: pidruchnyk. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
2. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., & Kyslyi, D. N. (2013). Definition of locomotive traction force with regard to uneven loading of wheel-motor block *Nauka ta prohres transportu. Science and Transport Progress*, 6(48), 63-71. (in Ukrainian)
3. Bodnar, B. Ye., Nechayev, Ye. H., & Bobyr, D. V. (2009). *Teoriya ta konstruktsiya lokomotyviv. Ekipazhna chastyna*: pidruchnyk. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
4. Bodnar, B. Ye., Niechaiev, Ye. H., & Bobyr, D. V. (2010). *Teoriya ta konstruktsiya lokomotyviv. Osnovy proektuvannya*: pidruchnyk dlia VNZ zaliznychnoho transportu. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
5. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., Afanasov, A. M., & Kyslyi, D. N. (2015). Definition of energy saving acceleration modes of trains. *Science and Transport Progress*, 5(59), 40-52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359> (in Ukrainian)
6. Hetman, H. K. (2010). *Teoriya elektrycheskoi tyahy*: monohrafiya (Ch. 1). Dnipropetrovsk: Izd-vo Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after. Academician V. Lazaryan. (in Russian)
7. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., Bodnar, Ye. B., & Ochkasov, O. B. (2022). *Ekspluatatsiya lokomotyviv ta lokomotyvne hospodarstvo. Orhanizatsiya remontnoho ta ekipirival'noho hospodarstva*: pidruchnyk. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
8. Kapitsa M. I., & Kyslyi, D. (2013). Vyznachennya tryvalosti vybihu lokomotyva pry perekhodi z rezhymu tyahy v rezhym hal'muvannya. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 136, 86-92. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.136.2013.107716> (in Ukrainian)
9. Kyslyi, D. M. (2016). Energy saving modes definition of trains handling. *Science and Transport Progress*, 1(61), 71-84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983> (in Ukrainian)
10. Kapitsa, M. I., Martyshevskiy, M. I., Kyslyi, D. N., & Palii, I. I. (2015). Technical and energy parameters improvement of diesel locomotives through the introduction of automated control systems of a diesel. *Science and Transport Progress*, 3(57), 176-185. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46077> (in English)
11. Kozachenko, D., Bobrovsky, V., Ochkasov, O., Shepotenko, A., & Hermaniuk, Y. (2018). Adaptation of Ukrainian Grain Elevators for Unit Train Loading. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : The 12th International Scientific Conference* (pp. 125-133). Kaunas University of Technology. Panevėžys, Lithuania. (in English)
12. Bodnar, B., Bolzhelarskiy, Y., Ochkasov, O., Hryshechkina, T., & Cerniauskaitė, L. (2018). Determination of integrated indicator for analysis of the traffic safety condition for traction rolling stock. In *The 12th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)* (pp. 45-54). Panevėžys, Lithuania. (in English)
13. Bodnar, B., Ochkasov, A., & Bobyr, D. (2016) Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir menas*, 7, 109-114. (in English)
14. Bodnar, B. E., Ochkasov, O. B., Bodnar, E. B., Hryshechkina, T. S., & Ocheretnyuk, M. V. (2018). Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 5(77), 28-40. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147740> (in English)
15. Bodnar, B., & Ochkasov, O. (2017). System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems. In *Transport Means: Proceedings of 21st International Scientific Conference* (pp. 43-47). Kaunas University of Technology Klaipėda University. Juodkrante, Kaunas, Lithuania. (in English)
16. Ochkasov, O., Ocheretniuk, M., & Skvireckas, R. (2021). Approaches to the Improving the Locomotive Fleet Management System. In *Transport Means 2021: Proceedings of the 25th International Conference* (Pt. III, pp. 1054-1058.). Kaunas University of Technology. Kaunas, Lithuania. (in English)
17. Ochkasov, O., Shvets, O., & Černiauskaitė, L. (2017). Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir menas*, 8, 68-71. (in English)
18. Kozachenko, D., Dovbnia, M., Ochkasov, O., Serdiuk, V., Shepotenko, A., & Keršys, A. (2018). Rationale for Choosing the Type of Traction Rolling Stock for the Enterprise of Industrial Transport. In *Transport Means 2018: Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf.* (Pt. II, pp. 991-995). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai»). Kaunas, Lithuania. (in English)

Надійшла до редколегії: 28.08.2023

Прийнята до друку: 25.12.2023

УДК 629.4.016–048.34:[519/863:629.424]

Д. М. КИСЛИЙ¹, А. Є. ДЕСЯК^{2*}, Д. В. БОБИРЬ³, Є. Б. БОДНАР⁴

¹Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 625 18 59, ел. пошта dmitriyakisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

^{2*}Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 949 41 95, ел. пошта andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

³Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 964 96 42, ел. пошта dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

⁴Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 059 39 91, ел. пошта melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

Визначення енергооптимізованого керування локомотивом під час розгону поїзда

Мета. У цій статті автори ставлять за основну мету вдосконалення математичної моделі руху поїзда за рахунок адаптації моделі для визначення значень потужності дизеля за відповідних значень прискорення поїзда та різних режимів його ведення. На підставі моделі передбачено побудувати та проаналізувати дво-параметричні залежності керування локомотивом під час розгону, які забезпечують усталене прискорення на різних ухилах профілю колії для різних значень маси складу, що в результаті дозволить більш раціонально керувати локомотивним парком із чітким дотриманням графіка руху поїздів та мінімальною витратою дизельного палива на тягу. **Методика.** Для досягнення мети використано метод системного аналізу, нелінійного програмування, числові методи розв'язання диференціальних рівнянь руху поїзда, причому враховано, що інтегрування рівняння руху поїзда можна проводити за шляхом, часом та швидкістю, залежно від початково поставленої задачі в тягових розрахунках. Розрахунки здійснено для різних режимів та фаз ведення поїзда. **Результати.** Для аналізу результатів проведено порівняння отриманих показників тягових розрахунків, таких як технічна швидкість, час руху в дорозі та витрата палива. Для розв'язання задачі тягових розрахунків було обрано програмний пакет «Maple», який дозволив не лише чисельно оцінити результати розв'язку двопараметричної математичної моделі, але і графічно, візуально, що значно спрощує їх сприйняття. Отримані результати розрахунків свідчать про зниження витрати енергоресурсів. **Наукова новизна.** Отримала подальший розвиток модель руху поїзда з урахуванням адаптації для визначення значень потужності дизеля у випадку усталених значень прискорення поїзда залежно від маси складу та ухилів профілю колії. **Практична значимість.** Доцільність проведеного дослідження полягає в економії енергоресурсів, зокрема дизельного палива, на тягу поїздів та дозволяє більш точно дотримуватися графіка руху поїздів, що, у свою чергу, впливає на безпеку руху в цілому.

Ключові слова: тяга поїздів; локомотив; рухомий склад; енергетична ефективність; енергоощадження; математична модель; рівняння руху поїзда

Вступ

Питанням енергооптимізації та скорочення експлуатаційних витрат у локомотивному господарстві присвячено велику кількість досліджень як вітчизняних, так і закордонних учених.

Поліпшення експлуатаційних витрат для проведення маневрових і вивізних робіт на маршрутах більшості приватних і державних підприємств промислового транспорту розглянуто в [17]. Автори дослідження встановили, що одним із варіантів вирішення вказаної проблеми для власників промислових підприємств може

бути наявність власного тягового рухомого складу. Техніко-економічні характеристики тягового рухомого складу повинні повністю відповідати умовам та обсягам маневрових робіт підприємства. Указано, що визначення найбільш раціонального типу тягового рухомого складу потрібно здійснювати з урахуванням наявної колійної інфраструктури підприємства, обсягів та організації маневрової й очисної роботи, організації системи і виробничої собівартості технічного обслуговування й ремонту. Автори запропонували методіку порівняльного аналізу техніко-експлуатаційних показників використання різних типів тягового рухомого складу з використанням методів тягових розра-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

хунків та способів організації експлуатаційної роботи. Прогнозовано, що це дозволить власнику обрати тип тягового рухомого складу, який найбільше відповідає умовам конкретного підприємства. При цьому забезпечується зниження витрат підприємства на експлуатацію тягового рухомого складу.

Аналіз питань енергооптимізації логістичних операцій та навантажувально-розвантажувальних робіт розглянуто в [11]. У роботі вказано, що одним з основних методів зниження витрат у логістичному ланцюгу експорту вантажів є використання технології перевезення одиничним поїздом. Проаналізовано використання різних технічних засобів для виконання маневрових робіт. Результати проведених досліджень можуть бути використані для проєктування й реконструкції наявних та будівництва нових підприємств, а також для оцінки витрат, пов'язаних із різними логістичними схемами доставки вантажів. Автори розробили методику та отримали техніко-експлуатаційну оцінку технічного оснащення та технології експлуатації приватних під'їзних колій для навантаження поїздів.

Удосконалення системи управління локомотивним парком є одним із суміжних завдань ресурсо- та енергоощадження. У [15] автори вказують на ефективність роботи технічного обслуговування локомотивного депо. На підставі аналізу застосування системи управління локомотивним парком провідних залізничних компаній вказано, що одним із напрямів удосконалення є розробка методів і прийомів оптимізованого оперативного планування процесів, пов'язаних з експлуатацією та ремонтом локомотивів. Автори наголошують, що ключову роль у вирішенні поставленої проблеми відіграє імітаційне моделювання, яке дозволяє проводити дослідження систем без зайвих витрат. З метою вдосконалення системи управління локомотивним парком автори провели аналіз підходів і методів моделювання в цій галузі й запропонували критерії оцінки ефективності системи управління локомотивним парком.

Суміжні питання ресурсоощадження за напрямом утримання тягового рухомого складу розглянуто в роботах [13] та [16]. Автори вказують, що для зниження експлуатаційних витрат необхідно вдосконалити процедури аналі-

зу результатів діагностики, і пропонують процедуру формування діагностичних ознак локомотивних вузлів на основі використання аналізу головних компонент. У роботах наведено приклади використання зазначеного підходу для обробки даних діагностики вузлів передач локомотивів. Результати застосування методики дозволили запропонувати використання трьох прихованих діагностичних параметрів для оцінки технічного стану передачі локомотива під час стендових випробувань.

Залізничні перевізні процеси на магістральних коліях мають підпорядковуватись графіку руху поїздів. Він є основою організації руху, який координує, узагальнює та об'єднує діяльність усіх підрозділів залізничного транспорту і відображає план експлуатаційної роботи залізниць. Виконання графіка руху поїздів є одним із найважливіших якісних показників роботи залізниць, а також непорушним законом для всіх працівників залізничного транспорту, невиконання якого може призвести від дрібних порушень та інцидентів до масштабних катастроф.

Дотримання графіка руху поїздів і недопущення його порушень має бути головним та непохитним правилом для всіх працівників, пов'язаних з організацією руху поїздів.

Порушення графіка руху поїздів суворо заборонено. Винятком є випадки, коли внаслідок відмови технічних засобів чи їх складових частин або стихійного лиха відбувається порушення графіка руху поїздів. У такому разі працівники всіх служб, пов'язаних із рухом поїздів, зобов'язані вживати всіх можливих оперативних заходів для введення до графіка пасажирських та вантажних поїздів, що запізнюються, і забезпечувати їх безпечно проходження по всьому маршруту.

Проведення тягових розрахунків дозволяє визначити кількість необхідних тягових потужностей для організації руху [1]. Від точності проведення тягових розрахунків безпосередньо залежить економічний ефект підприємств залізничного транспорту, ефективність використання локомотивного та вагонного парку. Моделювання руху поїзда проводять із застосуванням чисельних методів розв'язання рівняння руху, причому інтегрування рівняння руху поїзда можна проводити за шляхом, часом та швидкістю, залежно від поставленої задачі

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в тягових розрахунках. Розв'язання рівняння руху поїзда є спільними для всіх видів тяги і поділяється на дві групи. До першої групи належать задачі, для розв'язання яких передбачається, що поїзд рухається з усталеною швидкістю. Це дає можливість визначити масу поїзда та швидкість, яку він може розвинути під час руху по конкретному профілю колії. Другу групу задач розв'язують для неусталеного режиму руху. Це дозволяє розрахувати режими розгону та гальмування поїзда, швидкості та час руху по різних елементах профілю колії, можливість використання кінетичної енергії для подолання «інерційних» підйомів та інші параметри руху поїзда.

Мета

Автори ставлять за основну мету вдосконалити математичну модель руху поїзда, адаптовану для визначення значень потужності дизеля за відповідних значень прискорення поїзда. На підставі моделі передбачено побудувати двопараметричні залежності керування локомотивом під час розгону, які забезпечують усталене прискорення на різних ухилах профілю колії для різних значень маси складу.

Методика

Цикл ведення поїзда складається з таких режимів та фаз [9]:

- пуск локомотива та розгін поїзда до моменту виходу на потрібну обрану ходову характеристику локомотива;
- рух локомотива в режимі тяги на ходових позиціях контролера машиніста у випадку увімкнених тягових двигунів;
- рух локомотива у випадку вимкнених тягових двигунів у режимі вибігу;
- регульовальне гальмування – поїзд пригальмовують на спусках для підтримки швидкості в заданому діапазоні;
- режим гальмування з метою зниження швидкості перед сигналами різних видів і зупинками.

Кожна з цих складових має істотний вплив на результати використання потужності локомотивів та витрату дизельного палива на тягу поїздів у цілому.

Розглянемо окремі фази режиму ведення поїздів.

Режими пуску і розгону важливо виконувати якомога більш плавно, не допускаючи надто різкого зростання сили тяги локомотива [5]. Виконання цієї вимоги не допустить розриву поїзда та боксування колісних пар локомотивів, а також дозволить зрушити вантажний поїзд з місця легше та більш енергоефективно, якщо попередньо рухомий склад стиснути. Щоб не відбулося розриву поїзда, набирати позиції контролера машиніста можна після того, як весь поїзд разом із локомотивом буде в русі. У випадку тепловозної тяги після рушення поїзда з місця розгін необхідно виконувати, реалізуючи велику силу тяги.

Великий пусковий струм під час розгону поїзда доцільний тому, що дозволяє економити час і використовувати цей запас часу для більш тривалого руху в режимі вибігу та зниження швидкості перед гальмуваннями, а отже, економити енергоресурси на маршруті прямування.

Під час пуску та рушення з місця на тепловозах у режимі набору позицій головного руків'я контролера машиніста спрацьовують по чергово виконавчі механізми, що призводить до збільшення подачі палива в циліндри дизеля, відбувається ступінчасте регулювання потужності та частоти обертання колінчастого вала дизеля. Тому, щоб поліпшити робочий процес дизеля, важливо витримувати контролер машиніста на кожній позиції протягом певного часу.

Умови ведення поїзда на ділянці, регулювання потужності локомотива і швидкості руху суттєво різняться в усіх поїздах. За цих обставин рухомий склад повинен мати можливість реалізовувати великі як додатні, так і від'ємні прискорення. У разі високих швидкостей руху на коротких перегонах виникає необхідність початку гальмування з великих швидкостей. На ділянці, де чергуються різні елементи профілю, такі як підйоми, горизонтальні площадки та спуски, переважно необхідно вести поїзд в розтягнутому стані за увімкненого контролера машиніста. Під час руху по ділянках із рівнинним профілем колії і відносно нечастими зупинками необхідний режим ведення, який би забезпечував найменші зміни швидкості під час використання тієї чи іншої позиції, за відповідних найбільш високих значень ККД локомотива. Зменшення нерівномірності швидкості руху дає помітний ефект у вигляді нелінійної

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

залежності між силою опору руху і швидкістю руху рухомого складу. Здебільшого профіль ділянок залізничної мережі, на яких присутнє обмеження потужності локомотивів за зчепленням, характеризується наявністю підйомів великої крутизни, часто більших розрахункових підйомів, але відносно невеликої протяжності. Отже, під час розробки та впровадження раціональних режимів ведення поїздів на таких ділянках дуже важливо разом із реалізацією найбільших сил тяги постійно забезпечувати максимально можливе використання кінетичної енергії рухомого поїзда.

Оскільки кінетична енергія завжди пропорційна квадрату швидкості, то у випадку підходу поїзда до складних елементів профілю швидкість має бути найбільш допустимою, що дозволяє пройти частину підйому за рахунок повного використання накопиченої кінетичної енергії поїзда на попередніх елементах профілю. Під час руху на підйом швидкість падає по мірі використання кінетичної енергії, струм тягових двигунів починає зростати, проте переходити на нижчі позиції контролера машиніста слід тільки тоді, коли будуть досягнені обмежувальні значення струмів тягових двигунів, а отже, і сила тяги локомотива досягне граничних значень.

Для визначень раціональних режимів ведення поїздів потрібно обирати певні критерії оптимальності. Розглянемо прискорення поїзда як один із факторів, який впливає на раціональність режимів ведення [3, 14].

У динамічних розрахунках стійкості локомотива визначають відхильну силу Ψ під час руху в кривій ділянці, яка діє на весь локомотив [5, 14]:

$$\Psi = P_{\text{зч}} \left(\frac{V^2}{3,6^2 gR} - \frac{h}{2S} \right). \quad (1)$$

Цю силу можна зобразити як добуток маси на прискорення. Якщо масу позначити виразом

$$Q_{\text{зч}} = \frac{P_{\text{зч}}}{g}, \quad (2)$$

то прискорення локомотива α_n складе:

$$\alpha_n = \frac{V^2}{3,6^2 gR} - \frac{h}{2S}. \quad (3)$$

Якщо тепер із виразу визначити швидкість руху V , то отримана формула і буде математичним виразом критерію безпеки руху за горизонтальним незгашеним прискорення [5]:

$$V = \sqrt{R \left(\frac{gh}{2S} + g \right)} \cdot 3,6^2. \quad (4)$$

У науково-навчальній літературі [5, 14], цю формулу наводять із деяким округленням:

$$V = \sqrt{R(0,8h + 13\alpha_n)}, \quad (5)$$

Де критерій α_n розглядають як критерій комфортабельності і норму, установлену на залізницях ряду країн колишнього СРСР для горизонтального непогашеного прискорення, що становить $\alpha_n = 0,7 \text{ м/с}^2$.

Цей критерій розглядають із точки зору комфортабельності. Дослідженнями встановлено, що непогашене прискорення в межах $0,4\text{--}0,8 \text{ м/с}^2$ людина переносить задовільно, але 1 м/с^2 – уже задовільно лише в разі небагаторазового та нетривалого впливу.

У наш час, завдяки висновкам учених, як вимірювач відчуттів людини беруть не тільки саме прискорення, але й темп його зміни в часі. До речі, ця обставина лягла в основу багатьох зарубіжних досліджень плавності ходу в кривих. Установлено що зона чутливості людини за межами прискорення 1 м/с^2 починається з темпу:

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = 0,1 \text{ м/с}^3, \quad (6)$$

і в разі

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = 0,3\text{--}0,6 \text{ м/с}^3 \quad (7)$$

самовідчуття ще задовільне. Але вже в разі

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = 0,7\text{--}1,0 \text{ м/с}^3 \quad (8)$$

з'являється важкість у голові. Під час подальшого зростання темпу $d\alpha_n/dt$ наступають більш тяжкі наслідки не тільки для людини, але й для рухомого складу: у вагонах поїзда зміщуються ненадійно закріплені вантажі та, як найбільш тяжкий наслідок, може відбутися перекидання рухомого складу.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Якщо взяти максимальні $\alpha_n = 0,7 \text{ м/с}^2$ і $h = 150 \text{ мм}$, то

$$V_{\text{доп}} = 4,6\sqrt{R}. \quad (9)$$

Для порівняння слід відзначити, що на залізницях Франції встановлено

$$V_{\text{доп}} = 5,3\sqrt{R}. \quad (10)$$

Варто зазначити, що рух екіпажу відбувається з чергуванням кривих різного радіуса і прямих ділянок. Співвідношення тривалості руху в кривих і прямих, як і швидкостей руху, різні. Тому горизонтальне непогашене прискорення діє на людину не безперервно, а з інтервалами відпочинку, що згладжує його негативний вплив на організм людини.

Отже, для розрахунків беремо величину горизонтального непогашеного прискорення $\alpha_n = 0,4 \text{ м/с}^2$.

Під час опису будь-якого процесу руху тіла завжди фігурують три ключові величини – це відстань (шлях), час та швидкість. Для розв'язання задач руху необхідно визначити швидкість, яка буде змінюватися під дією прискорювальних сил, у кожен момент часу чи у кожній точці шляху [6]. На прискорення тіла, відповідно до другого закону Ньютона, впливають усі зовнішні сили, як керовані (створені вимушено під час процесу руху), так і некеровані (створені незалежно від керівних дій). Щоб визначити вищевказані параметри – фазові координати руху та діючі сили, необхідно скласти рівняння руху. Оскільки поїзд – це досить інерційна система, яка під час руху викликає зміну енергії в широкому діапазоні, то краще та доцільніше складати рівняння руху, виходячи з кінетичної енергії.

Під час руху на рухомий склад діє велика кількість різних сил. Якщо розглядати поїзд як матеріальну точку, то до них можна віднести силу опору, силу тяги, гальмівну силу та сили інерції. Якщо врахувати напрямок руху, то можна стверджувати, що сила тяги буде прискорювальною силою, сили опору та гальмівна сила – сповільнювальними силами. Вектор сил інерції завжди діє в напрямку, який буде протилежний до напрямку вектора прискорення.

Сила прискорення діє на поїзд лише в разі нерівномірного руху [1]. Для подолання сили

інерції T застосовують роботу керівних сил, тобто сили тяги F та гальмівної сили B , дію яких представляють у вигляді рівняння:

$$T = m_n \cdot a + m_o \cdot \alpha, \quad (11)$$

де m_n , m_o – маси поїзда, що рухаються поступально та обертально відповідно; a , α – поступально та обертальне прискорення відповідно.

Масою, яка рухається поступально m_n , є маса рухомого складу; масами, які рухаються обертально m_o , є усі колісні пари, якорі тягових електродвигунів, якорі підвагонних генераторів, тягові редуктори. На підставі теореми про кінетичну енергію системи [] можна стверджувати, що кінетична енергія поїзда буде становити:

$$E = \frac{m_n \cdot v^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot r_i^2 \cdot \omega_i^2}{2}. \quad (12)$$

Момент інерції частин рухомого складу, які обертаються, виражено як $m_i \cdot r_i^2$. З урахуванням коефіцієнта інерції мас, які обертаються, $(1 + \gamma)$, у диференціальному вигляді кінетична енергія поїзда буде записана так:

$$dE = m \cdot (1 + \gamma) \cdot v \cdot dv. \quad (13)$$

Згідно із законом про збереження енергії $dA = dE$ та з урахуванням $\xi = 1,32 / (1 + \gamma)$, диференціальне рівняння руху поїзда має вигляд:

$$\xi \cdot r = \ddot{S}, \quad (14)$$

де ξ – прискорення поїзда, на яке діє питома сила 1 Н/кН.

Рівняння руху цілого поїзда у вигляді ланцюга з розподіленою масою на підставі другого закону Ньютона можна представити у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dv}{ds} = \frac{R \cdot g}{v \cdot (P + Q)}; \\ \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v}, \end{cases} \quad (15)$$

де P , Q – маса локомотива та всього складу відповідно.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь числовим методом кожен елемент про-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

філю розбивають на кроки інтегрування ds (у разі інтегрування за шляху) або dt (для інтегрування за часом). Під кроком варіювання режимів ведення поїзда розуміють такий відрізок шляху ds , на якому режим руху не змінюється [14].

У результаті розв'язання диференціальних рівнянь руху поїзда за допомогою математичної моделі визначають кінцеву швидкість v_j , час dt або шлях ds та витрату палива dg для кожного елементарного кроку інтегрування, виходячи з початкової швидкості v_0 .

Рівнодіюча сила R , що діє на поїзд, є адитивною силою, яка складається з:

– дотичної сили тяги:

$$F_d = f(v, I_{\text{тед}}, \eta_{\Sigma}, u(x)); \quad (16)$$

– гальмівних сил:

$$B = f(v, u(x)); \quad (17)$$

– опору руху поїзда:

$$W = f(v, x), \quad (18)$$

де u – управління локомотивом за відповідного режиму роботи; x – координата центра мас поїзда [7].

Отже, бачимо, що накопичення поїздом кінетичної енергії відбувається під час розгону поїзда. Тому для обчислень обираємо саме цей режим.

Для побудови діаграми питомих рівнодіючих сил визначаємо розрахункові значення параметрів руху поїзда у вигляді графічних залежностей. Деякі з них – обмеження за зчепленням коліс із рейками та потужність дизеля тепловоза 2ТЕ116 – наводимо на [2] (рис. 1, 2).

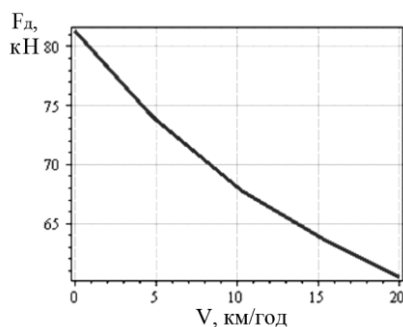


Рис. 1. Обмеження за зчепленням коліс із рейками

Fig. 1. Restrictions on wheel and rail adhesion

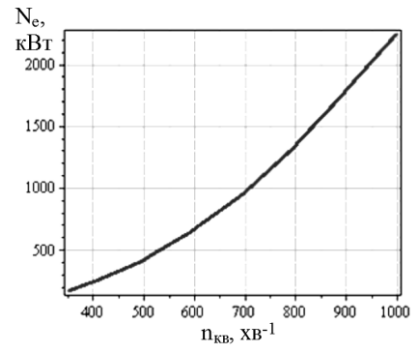


Рис. 2. Потужність дизеля

Fig. 2. Power of the diesel engine

Виконуємо побудову діаграми питомих рівнодіючих сил для режимів вибігу та службового гальмування (рис. 3) у пакеті символьних обчислень [14] з використанням залежностей [2, 5].

Безпосередньо сама програма визначення потужності дизеля та позиції керування, за якої прискорення поїзда певної маси (18 вагонів по 52 т) складає $0,4 \text{ м/с}^2$, складається з блоків циклічних обчислень тягових розрахунків, вихідними даними якої є потужність силової установки тепловоза, приведена до позицій керування контролером машиніста (ПКМ), варіативні значення ухилів профілю колії та маса складу, а розрахованими параметрами – значення позицій керування тепловозом, що відповідають прискоренню $0,4 \text{ м/с}^2$.

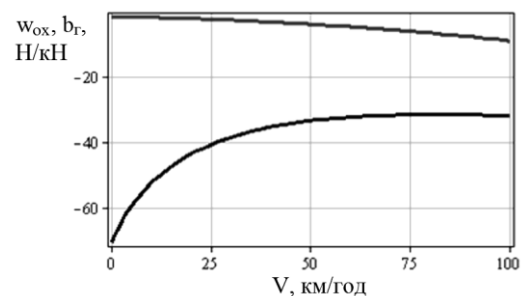


Рис. 3. Діаграма питомих рівнодіючих сил для режимів вибігу та гальмування складу масою 936 т з локомотивом 2ТЕ116

Fig. 3. Diagram of specific equivalent forces for the modes of running out and braking of a 936 t train with a 2TE116 locomotive

Фрагмент програми наведено на рис. 4 з використанням алгоритмів [10, 12].

Оптимізовані значення позицій керування тепловозом наводимо в табл. 1, 2 та на рис. 5, 6.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

```

while po < 21 do
Digits := 10; s[0] := 0; t[0] := 0; TOK[0] := 0; KPD[0] := 0; F[0] := 0; q[0] := 0;
  razgon[0] := 0; j := 1; vn := v[0]; dv := .5; uskor[0] := 1;
evalf(subs(nkv = pozic, Ne));
pozic := 1000;
while uskor[j-1] >= .4 do
TOK[j] := evalf(subs(skor_kmb = v[j-1]+dv, lted));
KPD[j] := evalf(.89*subs(Tok = TOK[j], '&eta;_ted')*subs(Tok = TOK[j],
  '&eta;_gen')*subs(Tok = TOK[j], '&eta;_vu'));
F[j] := (3.6*subs(nkv = pozic, Ne)*2)*KPD[j]/(v[j-1]+dv);
f[j] := 1000*F[j]/(9.81*(P+Q));
scpr := evalf(subs(v = v[j-1], fogr));
if f[j] > scpr then fkas := fogr;
Fkas := (1/1000)*(9.81*(P+Q))*subs(v = v[j-1], fkas);
Nd[j] := Fkas*v[j-1]/(3.6*KPD[j]) else fkas := f[j];
Nd[j] := subs(nkv = pozic, Ne) end if;
Fdot[j] := (1/1000)*(9.81*(P+Q))*subs(v = v[j-1], fkas)+10;
razgon[j] := evalf(subs(v=v[j-1], fkas)-subs(s = s[j-1], ukлон)-subs(v= v[j-1], wx));
if razgon[j] > 0 then
vk := vn+dv; dv2 := vk^2-vn^2 else vk := vn-dv; dv2 := vk^2-vn^2 end if;
vs := (vn+vk)*(1/2);
ds := 500*dv2/(zeta*razgon[j]);
dt := (1/1000)*ds*(60/vs);
q[j] := 2*subs(moshn_diz = Nd[j], ge)*dt*Nd[j]/(1000*60)+q[j-1];
uskor[j] := ((vk-vn)*1000)/(3600*dt*60);
v[j] := vk; s[j] := s[j-1]+ds; t[j] := t[j-1]+dt;
pozic := pozic-50; j := j+1 end do;
SKOR[po] := v[j-1]-5;
poziciya[po] := pozic+50;
print([SKOR[po], poziciya[po]]); po := po+1; v[0] := v[0]+5 end do;

```

Рис. 4. Фрагмент програми блоку циклічних обчислень тягових розрахунків
Примітка: в [] стоять індекси

Fig. 4. Program fragment of the block of cyclic calculations of traction calculations

Note: in [] are the indices

З метою оцінки розробленого алгоритму виконуємо тяговий розрахунок [2–4] для ділянки К.–В. довжиною 97,2 км.

Для розв'язання задачі тягових розрахунків прямування поїзда по ділянці обрано програмний пакет «Maple». Обраний програмний пакет дозволяє отримати фізико-механічні та енергетичні параметри руху поїзда як по ділянці в цілому, так і для кожного пікету ділянки. Подання розрахункових і вимірних значень параметрів руху поїзда здійснюється у вигляді графічних залежностей отриманих величин. Під час розрахунків отримано такі залежності: криві

швидкості, часу ходу поїзда, навантаження дизеля, а також профілю колії (рис. 7, 8).

Результати

За результатами розрахунків отримано такі дані (табл. 3).

Відсоткові різниці показників [8] становлять:

$$\Delta^n = \frac{k^m - q^{m'}}{k^m} \cdot 100, \quad (19)$$

Таблиця 1

Значення позицій керування тепловозом, що відповідають прискоренню 0,4 м/с² складу масою 936 т

Table 1

Values of locomotive control positions corresponding to acceleration of a train weighing 0.4 m/s² of a 936 t

i, ‰	Значення ПКМ за швидкості							
	0	5	10	15	20	25	30	35
–10	1	5	8	9	11	12	14	15
–9	1	5	8	10	11	13	14	15
–8	1	5	8	10	11	13	14	15
–7	1	5	8	10	12	13	14	15
–6	1	5	8	10	12	13	15	15
–5	1	5	8	10	12	13	15	15

Продовження табл. 1

Continuation of Table 1

i, ‰	Значення ПКМ за швидкості							
	0	5	10	15	20	25	30	35
–4	1	6	8	11	12	14	15	15
–3	1	6	9	11	12	14	15	15
...
6	1	7	10	12	14	15	15	15
7	1	7	10	12	14	15	15	15
8	1	7	10	12	14	15	15	15
9	1	7	10	12	14	15	15	15
10	1	7	10	13	14	15	15	15

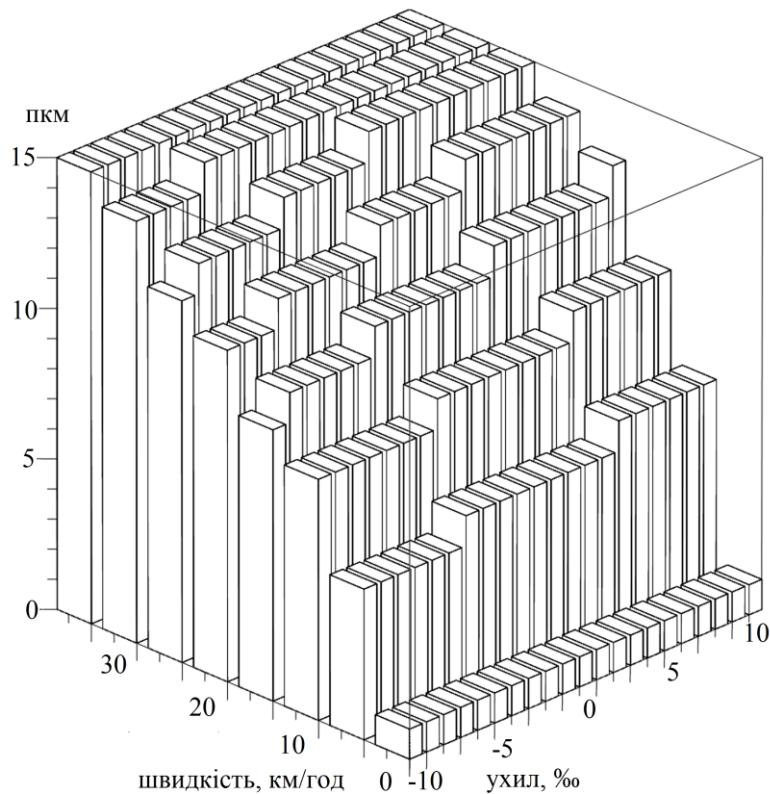


Рис. 5. Оптимізоване керування локомотивом зі складом масою 936 т

Fig. 5. Optimized control of a locomotive with a 936 t train

Таблиця 2

Значення позицій керування тепловозом, що відповідають прискоренню $0,4 \text{ м/с}^2$ складу масою 468 т

Table 2

Values of locomotive control positions corresponding to acceleration of 0.4 m/s^2 of a train weighing 468 t

i, ‰	Значення ПКМ за швидкості												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
-10	1	3	5	6	8	9	10	11	11	12	13	14	15
-9	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	13	14	15
-8	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	14	14	15
-7	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15
-6	1	3	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15
-5	1	3	5	7	8	9	11	11	12	13	14	15	15
-4	1	3	6	7	8	10	11	12	13	14	14	15	15
-3	1	3	6	7	9	10	11	12	13	14	15	15	15
...
6	1	4	7	8	10	11	12	13	14	15	15	15	15
7	1	4	7	8	10	11	12	13	15	15	15	15	15
8	1	4	7	9	10	11	12	14	15	15	15	15	15
9	1	4	7	9	10	11	13	14	15	15	15	15	15
10	1	4	7	9	10	11	13	14	15	15	15	15	15

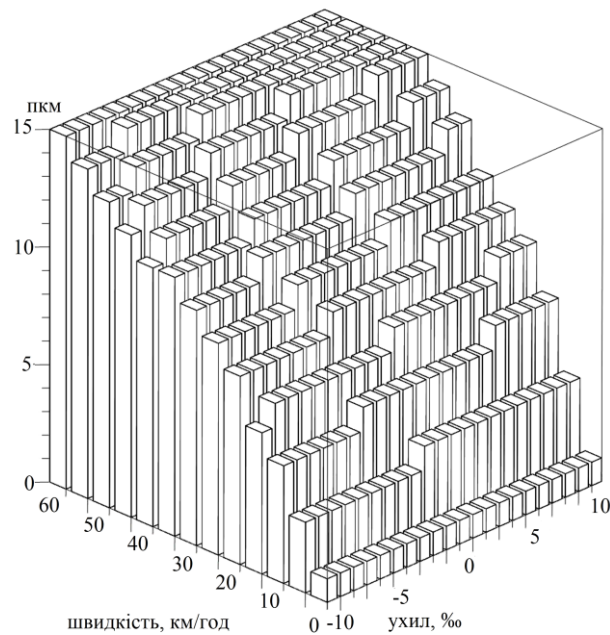


Рис. 6. Оптимізоване керування локомотивом зі складом масою 468 т

Fig. 6. Optimized control of a locomotive with a train weighing 468 t

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

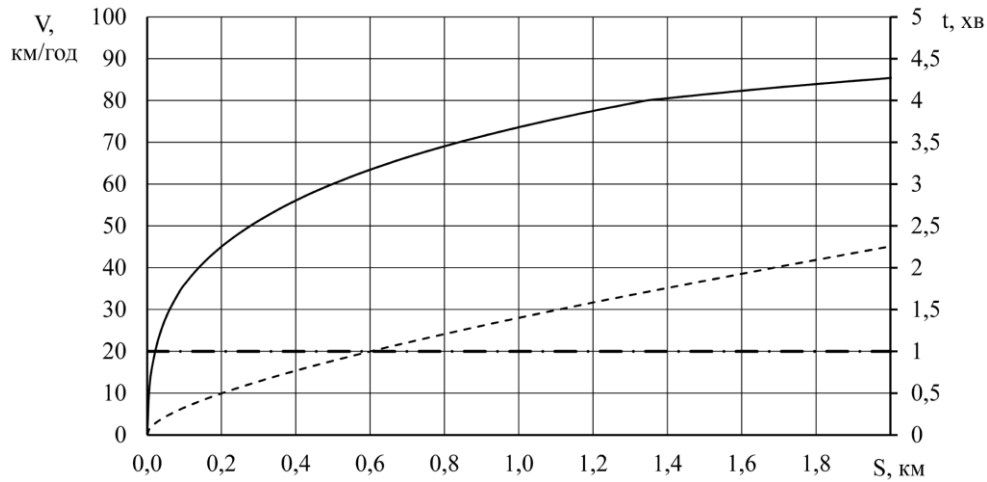


Рис. 7. Фрагмент тягового розрахунку поїзда зі складом 936 т для ділянки К.–В. без оптимізації за прискоренням:

— крива швидкості; - - - - крива часу; — · - - коефіцієнт потужності

Fig. 7. A fragment of the traction calculation of a train with a composition of 936 t for the section K.–V. without optimization by the root mean square:

— speed curve; - - - - time curve; — · - - power factor

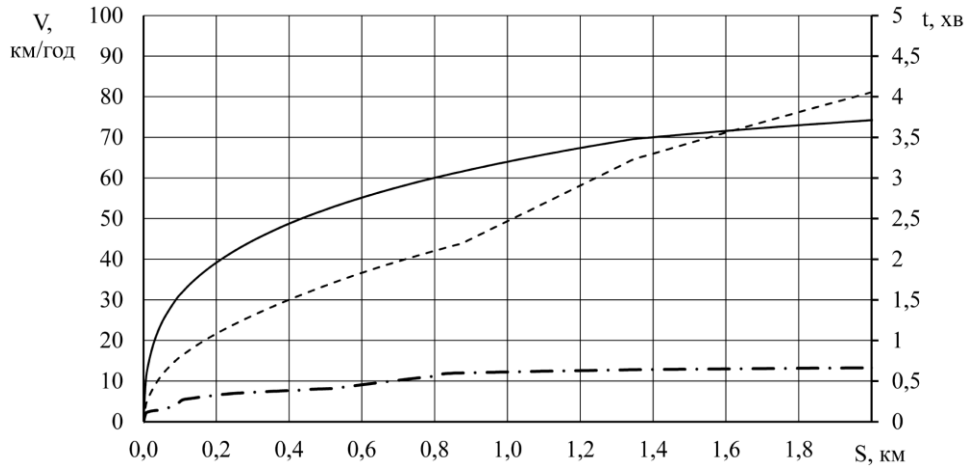


Рис. 8. Фрагмент тягового розрахунку поїзда зі складом 936 т для ділянки К.–В. з оптимізацією прискорення:

— крива швидкості; - - - - крива часу; — · - - коефіцієнт потужності

Fig. 8. Fragment of traction calculation of a train with 936 t for the section K.–V. with acceleration optimization:

— speed curve; - - - - time curve; — · - - power factor

Таблиця 3

Результати тягового розрахунку поїзда зі складом 936 т для ділянки К.–В.

Table 3

Results of traction calculation of a train with 936 t of glass for the section K.–V.

Параметр	Тяговий розрахунок без оптимізації за прискоренням	Тяговий розрахунок з оптимізацією за прискоренням
Технічна швидкість	84	79
Час у дорозі	70	75
Витрата палива	824	796

де m , m' – методи тягових розрахунків, для яких виконано порівняння; n – параметр порівняння.

Для технічної швидкості різниця складає:

$$\Delta^{\text{тш}} = \frac{84 - 79}{84} \cdot 100 = 6 \% ;$$

– часу в дорозі:

$$\Delta^{\text{ч}} = \frac{70 - 75}{70} \cdot 100 = -7 \% ;$$

– витрати палива:

$$\Delta^{\text{вп}} = \frac{824 - 796}{824} \cdot 100 = 3,4 \% .$$

Наукова новизна та практична значимість

У роботі отримала подальший розвиток модель руху поїзда з урахуванням адаптації в разі визначення значень потужності дизеля для усталених значень прискорення поїзда залежно від маси складу та ухилів профілю колії.

Практична значимість полягає в оптимізації режимів ведення поїзда, що, у свою чергу дозволяє точно дотримуватися графіка руху поїздів із використанням мінімальної кількості енергоресурсів (у випадку тепловозної тяги – дизельного палива) із забезпеченням безпеки руху.

Висновки

За результатами роботи можна зробити такі висновки:

1. Для вдосконалення математичної моделі руху поїзда і її реалізації в програмі енергооптимізації режимів ведення поїздів був використаний оптимізований класичний метод тягових розрахунків з упровадженням функції оптимізації розрахунків за прискоренням.

2. Отримані дані розрахунків свідчать про зниження витрати енергоресурсів. Так, витрата енергоресурсів знизилась на 3,4 %, загальний час поїздки без урахування простоїв на станціях збільшився на 7 %, а технічна швидкість знизилась на 6 %. Слід зазначити, що розрахунковий час розгону з використанням функції оптимізації за прискоренням є сталою величиною, яка впливає на поліпшення виконання графіка руху поїздів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барибін М. А., Фалендиш А. П., Клецька О. В., Іванченко Д. А., Кіріцева О. В. Удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 5 (95). С. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550>
2. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги*: підручник. Дніпро: Український державний університет науки і технологій, 2022. 385 с.
3. Боднар Б. Є., Капіца М. І., Афанасов А. М., Кислий Д. М. Визначення енергозаощаджуючих режимів розгону поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 5 (59). С. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359>
4. Боднар Б. Є., Капіца М. І., Боднар Є. Б., Очкасов О. Б. *Експлуатація локомотивів та локомотивне господарство. Організація ремонтного та експлуатаційного господарства*: підручник. Дніпро: Український державний університет науки і технологій, 2022. 220 с.
5. Боднар Б. Є., Капіца М. І., Кислий Д. М. Визначення сили тяги локомотива з урахуванням нерівномірності навантаження колісно-моторних блоків. *Наука та прогрес транспорту*. 2013. № 6 (48). С. 63–71.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобир Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина* : підручник. Дніпропетровськ : Ліра ЛТД, 2009. 284 с.
7. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобир Д. В. *Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування* : підручник для ВНЗ залізничного транспорту. Дніпропетровськ : ПП «Ліра ЛТД», 2010. 358 с.
8. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : монографія : в 2 т. Дніпропетровськ : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2010. Т. 1. 450 с.
9. Капіца М. І., Кислий Д. М. Визначення тривалості вибігу локомотива при переході з режиму тяги в режим гальмування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2013. Вип. 136. С. 86–92. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.136.2013.107716>
10. Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
11. Bodnar B., Ochkasov O. Devising a procedure to form the diagnostic parameters for locomotives using a principal components analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Т. 2, № 1 (110). С. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230293>
12. Bondar B., Kapitsa M., Bobyr D., Kyslyi D. Defining the limits of application and the values of integration variables for the equations of train movement. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 6. P. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/9>
13. Kapitsa M. I., Martysheskyi M. I., Kyslyi D. N., Palii I. I. Technical and energy parameters improvement of diesel locomotives through the introduction of automated control systems of a diesel. *Science and Transport Progress*. 2015. No 3 (57). P. 176–185. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46077>
14. Kozachenko D., Bobrovsky V., Ochkasov O., Shepotenko A., Hermaniuk Y. Adaptation of Ukrainian Grain Elevators for Unit Train Loading. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : The 12th International Scientific Conference (Panevėžys, 27–28 Apr. 2018)*. Kaunas University of Technology. Panevezys, 2018. P. 125–133.
15. Kozachenko D., Dovbnia M., Ochkasov O., Serdiuk V., Shepotenko A., Keršys A. Rationale for Choosing the Type of Traction Rolling Stock for the Enterprise of Industrial Transport. *Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018 (Trakai, 03–05 Oct. 2018)*. Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB “Lietuvos Geležinkeliai”). Kaunas, 2018. Pt. II. P. 991–995.
16. Ochkasov O., Ocheretniuk M., Skvireckas R. Approaches to the Improving the Locomotive Fleet Management System. *Transport Means 2021 : Proceedings of the 25th International Conference (Kaunas, 06–08 Oct. 2021)*. Kaunas University of Technology. Kaunas, 2021. Pt. III. P. 1054–1058.
17. Ochkasov O., Shvets O., Černiauskaitė L. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir menas*. 2017. № 8. P. 68–71.

D. M. KISLIY¹, A. Y. DESIAK^{2*}, D. V. BOBYR³, E. B. BODNAR⁴

¹Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 625 18 59, e-mail dmitriy.kisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

^{2*}Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 949 41 95, e-mail andrey.desyak1992@gmail.com, ORCID 0000-0001-8650-5242

³Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 964 96 42, e-mail dmitrob@ua.fm, ORCID 0000-0003-1441-3861

⁴Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 059 39 91, e-mail melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

Determination of Energy-Optimized Locomotive Control During Train Acceleration

Purpose. In this article, the authors aim to improve the mathematical model of train movement by adapting the model to determine the values of diesel power at the corresponding values of train acceleration and different modes of train operation. Based on the model, it is planned to build and analyze two-parameter dependencies of locomotive control during acceleration, which provide steady acceleration on different track profile slopes for different values of train weight, which will allow for more rational management of the locomotive fleet with strict adherence to the train schedule and minimal diesel fuel consumption for traction. **Methodology.** To achieve this goal, we used the method of system analysis, nonlinear programming, and numerical methods for solving differential equations of

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

train motion, taking into account that the integration of the equation of train motion can be carried out by path, time, and speed, depending on the initially set task in traction calculations. Calculations were performed for different modes and phases of train operation. **Findings.** To analyze the results, we compared the obtained traction calculations, such as technical speed, travel time, and fuel consumption. To solve the problem of traction calculations, we chose the Maple software package, which allowed us not only to numerically evaluate the results of solving the two-parameter mathematical model, but also to graphically and visually, which greatly simplifies their perception. The obtained results of the calculations indicate a decrease in energy consumption. **Originality.** The model of train movement has been further developed, taking into account the adaptation to determine the values of diesel power consumption in the case of steady-state values of train acceleration depending on the weight of the train and the slopes of the track profile. **Practical value.** The expediency of the study is to save energy resources, in particular diesel fuel, for train traction and allows more accurate adherence to the train schedule, which, in turn, affects traffic safety in general.

Keywords: train traction; locomotive; rolling stock; energy efficiency; energy saving; mathematical model; equation of train motion

REFERENCES

1. Barybin, M. A., Falendysh, A. P., Kletska, O. V., Ivanchenko, D. A., & Kiritseva, O. V. (2021). Improvement of Traction Calculations and Driving Modes of Traction Rolling Stock. *Science and Transport Progress*, 5(95), 71-83. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/253550> (in Ukrainian)
2. Bobyr, D. V., Hryshchenko, M. A., & Serdyuk, V. N. (2022). *Teoriya lokomotyvnoyi tyahy: pidruchnyk*. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
3. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., Afanasov, A. M., & Kyslyi, D. N. (2015). Definition of energy saving acceleration modes of trains. *Science and Transport Progress*, 5(59), 40-52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359> (in Ukrainian)
4. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., Bodnar, Ye. B., & Ochkasov, O. B. (2022). *Ekspluatatsiya lokomotyviv ta lokomotyvne hospodarstvo. Orhanizatsiya remontnoho ta ekipiruvanoho hospodarstva: pidruchnyk*. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies. (in Ukrainian)
5. Bodnar, B. Ye., Kapitsa, M. I., & Kyslyi, D. N. (2013). Definition of locomotive traction force with regard to uneven loading of wheel-motor block. *Nauka ta prohres transportu. Science and Transport Progress*, 6(48), 63-71. (in Ukrainian)
6. Bodnar, B. Ye., Nechayev, Ye. H., & Bobyr, D. V. (2009). *Teoriya ta konstruktsiya lokomotyviv. Ekipazhna chastyna: pidruchnyk*. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
7. Bodnar, B. Ye., Niechaiev, Ye. H., & Bobyr, D. V. (2010). *Teoriya ta konstruktsiya lokomotyviv. Osnovy proektuvannia: pidruchnyk dlia VNZ zaliznychnoho transportu*. Dnipropetrovsk: Lira LTD. (in Ukrainian)
8. Hetman, H. K. (2010). *Teoriya elektrycheskoi tyahy: monohrafyia* (Ch. 1). Dnipropetrovsk: Izd-vo Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after. Academician V. Lazaryan. (in Russian)
9. Kapitsa M. I., & Kyslyi, D. (2013). Vyznachennya tryvalosti vybihu lokomotyva pry perekhodi z rezhymu tyahy v rezhym hal'muvannya. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 136, 86-92. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.136.2013.107716> (in Ukrainian)
10. Kyslyi, D. M. (2016). Energy saving modes definition of trains handling. *Science and Transport Progress*, 1(61), 71-84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983> (in Ukrainian)
11. Bodnar, B., & Ochkasov, O. (2021). Devising a procedure to form the diagnostic parameters for locomotives using a principal components analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1(110)), 97-103. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230293> (in English)
12. Bondar, B., Kapitsa, M., Bobyr, D., & Kyslyi, D. (2019). Defining the limits of application and the values of integration variables for the equations of train movement. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 59-65. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/9> (in English)
13. Kapitsa, M. I., Martyshevskiy, M. I., Kyslyi, D. N., & Palii, I. I. (2015). Technical and energy parameters improvement of diesel locomotives through the introduction of automated control systems of a diesel. *Science and Transport Progress*, 3(57), 176-185. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46077> (in English)
14. Kozachenko, D., Bobrovsky, V., Ochkasov, O., Shepotenko, A., & Hermaniuk, Y. (2018). Adaptation of Ukrainian Grain Elevators for Unit Train Loading. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : The 12th International Scientific Conference* (pp. 125-133). Kaunas University of Technology. Panevėžys, Lithuania. (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

15. Kozachenko, D., Dovbnia, M., Ochkasov, O., Serdiuk, V., Shepotenko, A., & Keršys, A. (2018). Rationale for Choosing the Type of Traction Rolling Stock for the Enterprise of Industrial Transport. In *Transport Means 2018: Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf.* (Pt. II, pp. 991-995). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai»). Kaunas, Lithuania. (in English)
16. Ochkasov, O., Ocheretniuk, M., & Skvireckas, R. (2021). Approaches to the Improving the Locomotive Fleet Management System. In *Transport Means 2021: Proceedings of the 25th International Conference* (Pt. III, pp. 1054-1058.). Kaunas University of Technology. Kaunas, Lithuania. (in English)
17. Ochkasov, O., Shvets, O., & Černiauskaitė, L. (2017). Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir menas*, 8, 68-71. (in English)

Надійшла до редколегії: 18.08.2023

Прийнята до друку: 19.12.2023

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 69:658.5

А. О. ІЧЕТОВКІН^{1*}

^{1*}Каф. «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (067) 625 57 92, ел. пошта artem.ichetovkin72@gmail.com, ORCID 0000-0002-5894-5168

Аналіз механізму вибору організаційно-технологічних рішень інтегрованого управління будівельними процесами

Мета. Основна мета цієї статті полягає в ретельному обґрунтуванні можливостей впровадження механізму вибору організаційно-технологічних рішень для досягнення параметричних критеріїв управління будівельними процесами, особливо в умовах невизначеності. Для досягнення цієї мети ми використовуємо функціональну модель системно-інтегрованого підходу, яка дозволяє систематизувати та координувати функції управління на рівні окремих процесів. **Методика.** Дослідження ґрунтується на впровадженні нових вимог до нормування в будівельній галузі, зокрема на застосуванні параметричного методу. Цей метод може поліпшити управлінські стратегії, методи та технології, а також сприяти впровадженню інноваційних організаційно-технологічних рішень. У результаті можна підвищити якість та обсяги будівництва, що, у свою чергу, сприятиме подоланню кризи та розвитку будівельної галузі. Процес управління передбачає досягнення ключової мети, а саме ефективності реалізації проекту, при цьому будівництво має певну специфіку, яка ускладнює процес управління та передбачає застосування більш складних, інтегрованих та таких, що мають різне спрямування, організаційно-технологічних рішень. **Результати.** У сучасних умовах господарювання, що передбачають як зростання кількості ризиків у сфері будівництва, так і розмірів їх можливих наслідків, в умовах підвищення (розширення переліку) вимог якості до об'єктів будівництва, обґрунтовано виникає необхідність пошуку та вдосконалення організаційно-технологічних рішень з метою застосування нових підходів до управління будівельними процесами, пов'язаними з практичним впровадженням результатів сучасних науково-методичних досліджень. Отримані результати, однак, указують на те, що застосування параметричного методу породжує нові виклики для ефективності управління в будівельній галузі. Збільшення кількості альтернатив управлінських рішень, ідентифікація ризиків та вдосконалення процесів прогнозування наслідків можуть викликати певні труднощі. З іншого боку, відсутність чітких вимог може призвести до збільшення витрат та ризиків. **Наукова новизна.** У роботі обґрунтовано необхідність використання загальносистемного алгоритмічного механізму для ефективного керування будівельними процесами в умовах невизначеності. Це важливо для адаптації до сучасних викликів та забезпечення сталого розвитку будівельної галузі. **Практична значимість.** Дослідження дає можливість визначати відповідність організаційно-технологічних рішень встановленим критеріям та порівнювати їх для вибору найбільш ефективного, зокрема з точки зору вартості, досягнення ефективності та нівелювання ризиків.

Ключові слова: управління будівельними процесами; нормування; параметричний метод; інтегрований підхід; процесний підхід; ситуаційний підхід; механізм вибору організаційно-технологічних рішень

Вступ

Уведення нових вимог до нормування в будівельній галузі, відповідно до Закону України від 19 жовтня 2019 року «Про внесення змін до ЗУ “Про будівельні норми”», передбачає суттєві зміни в методиці нормування [1, 4]. У сучасній світовій практиці використовують три ме-

тоди нормування: розпорядчий (який застосовували в Україні до прийняття Закону), параметричний та цільовий. Важливо відзначити, що у світі, а тепер і в Україні перевагу надають параметричному методу. Розпорядчий метод, який досі був єдиним в Україні, за новим законодавством, не забезпечує альтернатив для вибору найбільш ефективних організаційно-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

технологічних рішень та надає чіткий поелементний опис об'єкта нормування. Це ускладнює можливість застосування альтернативних проектних рішень, конструкцій, матеріалів тощо і гальмує прозоре та швидке впровадження інноваційних технологій. За цим методом були розроблені радянські ДБН, які в наш час застаріли, не враховують сучасні тенденції та розвиток технологій у будівельній галузі [10].

Важливо відзначити, що методи нормування, які використовують під час розробки міжнародних та глобальних стандартів, традиційно є розпорядчими. Але останнім часом спостерігається тенденція розробників переважно до параметричного підходу в нормуванні. Це пояснюється потребою застосування міжнародних стандартів як настановчих документів, які визначають цілі нормування та функціональні вимоги до об'єкта нормування [4].

На наш погляд, це створює передумови для інтегрованого управління з використанням відповідних організаційно-технологічних рішень, які мають відображати вимоги якості управління, а також ризик-менеджменту в будівництві. Реалізація нових законодавчих положень дозволить спростити процес розроблення, затвердження та використання будівельних норм. Це, у свою чергу, відкриє можливості для українських забудовників використовувати сучасні методи, технології (включаючи BIM-технології), організаційно-технологічні рішення та новаторські підходи, щоб підвищити якість та збільшити обсяги будівництва [2, 8]. У перспективі це може сприяти позитивному впливу на вихід із кризи та загальний розвиток будівельної галузі.

У цій статті уточнено застосування параметричного методу в будівництві, що забезпечує необмежені можливості для технічної творчості, розширює спектр управлінських стратегій у зазначеній галузі та виступає важливим інструментом для прийняття ефективних рішень [1]. Цей метод передбачає максимальну гнучкість у системі прийняття рішень, дозволяє інженерам та дизайнерам ефективно адаптувати параметри будівельного процесу залежно від конкретних вимог, умов та цілей проекту.

Його основні переваги полягають у можливості легкої зміни параметрів будівельного об'єкта, швидкості адаптації до змін у вимогах

чи умовах будівництва, а також спрощенні процесу прийняття рішень завдяки візуалізації впливу змін на результати проекту. Параметричний метод є не лише інноваційним інструментом для проектування, а й потужним засобом підвищення продуктивності та ефективності будівельних процесів, сприяючи реалізації новаторських ідей у будівництві. А також це збільшення альтернатив управлінських та організаційно-технологічних рішень (ОТР) (формування обґрунтованих критеріїв для вибору рішень), ідентифікація переліку та наслідків ризиків для кожної альтернативи, удосконалення процедур і процесів прогнозування наслідків кожної з альтернатив, висунування нових вимог до необхідної інформації для прийняття рішень та розвитку можливостей її аналізу й інтерпретації [9, 10].

Проте параметричний метод, окрім переваг, які були вказані вище, також породжує нові виклики для ефективності управління в будівельній галузі.

Використання такого механізму вибору організаційно-технологічних рішень, разом із відсутністю чітких вимог та розпоряджень, може збільшити витрати на досягнення встановлених вимог якості та надійності об'єкта будівництва. А це може підвищити фінансові та організаційно-технічні ризики для забудовника, такі як витрати на виправлення дефектів, асоційовані зі значними витратами. Дефекти також можуть виникнути на етапі експлуатації, що потребує чіткої координації дій у контролі та оцінюванні якісних показників та удосконалення вимог до процедур уведення об'єкта в експлуатацію. Для досягнення ефективності параметричного підходу необхідно, щоб він охоплював весь комплекс системних компонентів технічного регулювання та поєднував керівні системи в рамках інтегрованого управлінського підходу. Такі рухи, крім того, ставлять перед нами конкретні додаткові вимоги щодо оптимізації та удосконалення організаційно-технологічних вирішень у будівельних процесах.

Мета

Наукова стаття має на меті систематизовано описати та обґрунтувати потенціал застосування механізму вибору організаційно-технологічних рішень, спрямованих на досяг-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нення параметричних критеріїв, що виступають цільовими показниками управління будівельними процесами, особливо в умовах невизначеності. Для цього використано функціональну модель системно-інтегрованого підходу, що дозволяє збалансувати та оптимізувати вибір стратегій та рішень у будівельній сфері в умовах нестабільності та невизначеності.

Методика

Аналіз досліджень, спрямованих на розвиток сучасних підходів та моделей організаційно-технічного розвитку будівельного виробництва [1], потребує детального розгляду системних факторів управління в будівництві [5, 6], ефективності параметричного методу нормування [8], створення інформаційної моделі об'єкта нормування параметричним методом [10], а також проведення інших досліджень, що передбачають вивчення можливостей упровадження інтегрованого управлінського підходу для оптимізації будівельних процесів [6, 7, 9, 11, 12] із врахуванням аспектів оцінювання, обґрунтування та раціонального вибору організаційно-технологічних рішень у будівництві [2, 3, 5].

Вищесказане дає підґрунтя для активізації пошуку ефективного механізму управління будівельними процесами. Цей пошук враховує сучасні тенденції та організаційно-технологічний розвиток будівельної галузі, зміни в законодавстві, а також вимоги до якості, надійності та безпеки будівельних об'єктів.

З урахуванням актуальності питань підвищення ефективності управлінських підходів у будівельних процесах, упровадження новітніх стратегій та організаційно-технологічних рішень, вважаємо за доцільне розробити механізм вибору організаційно-технологічних рішень. Цей механізм буде ґрунтуватися на інтегрованому підході управління будівельними процесами, що враховує сучасні тенденції та організаційно-технологічний розвиток галузі.

Результати

Вивчення ефективності наявних систем управління [1, 6, 9, 11–13] підкреслює необхідність комплексного та збалансованого поєднання механізмів процесного та ситуаційного підходів в управлінні будівельними процесами.

У цьому контексті одним із важливих завдань управління будівельними процесами в умовах ризиків є впровадження запобіжних заходів та, у випадку виникнення непередбачених ситуацій чи відхилень від параметричних показників якості, застосування ефективних та економічних методів для їх виправлення. Деякі проблемні ситуації (дефекти) можуть бути подолані з мінімальними втратами, якщо ухвалено своєчасні та ефективні рішення щодо вибору організаційно-технологічних заходів, методів управління та забезпечення необхідними матеріально-технічними ресурсами.

Це передбачає вдосконалення наявних підходів до автоматизованого управління проектами та підвищення рівня інформаційної та інтелектуальної підтримки у прийнятті рішень. Ці аспекти також слід розглядати в рамках інтегрованого підходу [1–3, 5, 10]. Серед передумов застосування інтегрованого управління будівельними процесами виділяємо:

- застосування ймовірнісних методів та моделей у прийнятті рішень;
- поєднання дискретного та безперервного процесів будівництва та управління;
- відсутність повної формальної моделі об'єкта та методів управління через великий рівень невизначеності;
- необхідність аналізу значної кількості інформації під час управлінського прийняття рішень;
- велика розмірність завдань у прийнятті рішень та існування декількох рівнів управління;
- інтенсивна динаміка змін у будівельній галузі (законодавство, технології, фінанси тощо);
- вплив випадкових факторів на процес, часто нечіткість завдань у прийнятті рішень.

У рамках цього дослідження будемо застосовувати інтегрований підхід, який включатиме механізми вибору організаційно-технологічних рішень. Цей підхід спрямований на забезпечення якісних характеристик об'єкта будівництва, досягнення параметричних показників будівельного процесу та організацію менеджменту якості (QM) за допомогою організаційного механізму прийняття рішень. Механізм враховує фактори невизначеності (ризик-менеджмент (RM)), передбачає ідентифікацію ризиків, оці-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нювання ймовірностей настання наслідків (втрат) від ризиків, процедури їх мінімізації та інші аспекти.

Ефективність ухвалення рішень у межах застосування процесного підходу істотно збільшується завдяки інформаційним та функціональним зв'язкам необхідних операцій та процедур ухвалення рішень, які визначені в рамках відокремлених процесів. Крім того, у зв'язку з ризиками та невизначеністю, що впливають зі складності будівельних процесів, ситуаційний підхід стає важливим – необхідність використання механізмів прийняття рішень у непередбачених ситуаціях, які не були враховані в бюджеті. Це передбачає визначення потенційних наслідків та розробку алгоритмів для впровадження необхідних організаційно-технологічних рішень, де додатково важливо дотримуватися обмеженого часу на ухвалення та втілення рішення.

Оптимізація організаційно-технологічних рішень спрямована на вибір найкращого варіанта серед можливих альтернатив, що, з урахуванням певних умов та вимог до цільових показників якості, безпеки та функціональності [1–3, 12, 13], дозволяє досягти максимального скорочення термінів виконання робіт та ефективного використання матеріально-технічних ресурсів. Оптимальність рішень досягається шляхом варіативного проектування та всебічного аналізу альтернатив. Суть оптимізаційного пошуку полягає в розбитті процесу проектування на етапи, що дозволяє аналізувати організаційно-технологічні зв'язки між окремими елементами та порівнювати варіанти на кожному етапі або порівнювати їх із базовим (аналоговим) варіантом.

Важливим аспектом є визначення критеріїв оптимальності, що часто є індивідуальними для кожного будівельного об'єкта відповідно до організаційної структури будівельної організації, форми та типу фінансування і тощо. З точки зору оптимальності, ОТР можна розглядати як комплекс заходів, який включає організаційні, технічні і технологічні аспекти. Це реалізується на основі інтегрованого підходу до управління будівельними процесами, що враховує всі ймовірні перспективи впливу кожного організаційно-технологічного рішення на встановлені цільові показники якості, надійності, функціона-

льності та ефективності реалізації проєкту [1]. У бізнес-процесах, коли розв'язують конкретну проблему, інтегрований підхід розглядають як метод, що дозволяє враховувати всі ймовірні перспективи, що робить його найефективнішим методом оцінки.

Отже, взаємодія алгоритмічних механізмів має бути націлена на досягнення критеріїв системності та комплексності процесу підтримки прийняття рішення з організаційно-технологічних питань. Це передбачає здійснення детермінованого контролю за часом реалізації, що, у свою чергу, сприяє зменшенню рівня невизначеності та пов'язаного з ними ризику. Шляхом структурування експертних висновків, визначення та систематизації параметрів і критеріїв вибору можна забезпечити належне інформаційне та функціональне наповнення системи.

Виявлення ризику включає комплекс процесів у межах конкретного організаційно-технологічного рішення протягом визначеного часу. Цей показник обчислюють як результат i -го ризику (втрати) – Li . Також для ранжування та аналізу ризиків (Ri) за рівнем впливу на проєкт важливим є оцінювання його ймовірності (pi). Прогнозоване значення ризику використовують для визначення резерву часу (або матеріально-технічних ресурсів) у забезпеченні надійності) [1, 6, 8]:

$$Ri = Li \cdot pi . \quad (1)$$

Об'єднання дискретного процесу управління та дискретно-безперервного виробництва в будівництві, з урахуванням множини різнорідних параметрів, високого ступеня неоднозначності під час оцінки ймовірного стану об'єкта та складності вибору оптимального рішення серед численних альтернатив в умовах невизначеності та ризиків, вимагає розробки ситуаційних моделей у рамках ситуаційного підходу. Останній дозволяє кількісно оцінювати (розбивати діапазон відлікових значень на обмежену кількість рівнів та округляти їх до одного з двох найближчих рівнів) потоки управлінських впливів за часом та обсягом впливу.

Це надає можливість побудови ситуаційної моделі – сигнатури, яка базується на [6, 8]:

$$M_{co} = \langle O, \Omega, \Omega_s, K_s(\Omega), K_t(\Omega_s) \rangle, \quad (2)$$

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

де $O = O_{od} \cap O_{ep}$ – сукупність об'єктів ОТР; O_{od} – множина процесів ОТР; O_{ep} – множина під процесів (процедур) у межах ОТР; $\Omega = \langle O_1 \times O_2 \times O_3 \dots \times O_n \rangle$ – простір стану системи управління, n – кількість ОТР; Ω_δ – множина допустимих станів об'єкта, $\Omega_\delta \cap \Omega$; $K_s(\Omega)$ – обмеження стану об'єкта управління, $K_s(\Omega) \rightarrow \Omega_\delta$; $K_t(\Omega_\delta)$ – критерії переходу об'єкта ОТР в просторі траєкторії руху:

$$\Omega_\delta^1 = K_t(\Omega_\delta^2), \text{ де } \Omega_\delta^1, \Omega_\delta^2.$$

У випадку виникнення відхилення параметричних показників S_i необхідне коригування через упровадження конкретного організаційно-технологічного рішення, що можна виразити як функцію:

$$S_i = \langle \Omega^{S_i}, K_{ij}(\Omega_\delta), L_k(t), \Omega_\delta^k, \varphi(\Omega_\delta^\Pi, L_k(t)) \rangle, (3)$$

де Ω^{S_i} – множина параметрів стану системи управління, що відповідають ситуації (S_i) виникнення відхилення параметричних показників; Ω_δ^Π – поточний стан ОТР; $K_{ij}(\Omega_\delta)$ – критерії формування станів Ω^{S_i} ; $L_e(t)$ – керівні впливи, спрямовані на кінцевий стан об'єкта управління відповідно до поставленої мети (параметрів) управління; Ω_δ^e – множина бажаних альтернативних кінцевих станів об'єкта управління; $\varphi(\Omega_\delta^\Pi, L_e(t))$ – умови перетворення величин керівного впливу для переходу об'єкта управління з поточного стану (що потребує коригувальних дій) у цільовий (новий) Ω_δ^Π ,

$$\Omega_\delta^\Pi = \varphi(\Omega_\delta^\Pi, L_e(t)).$$

Використання ситуаційного підходу дозволяє розподілити стани елементарних об'єктів управління, на які спрямовані організаційно-технологічні рішення, на множину ситуацій, на рівні яких реалізується процес прийняття рішень через вибір послідовності зміни стану об'єкта (ситуацій) або траєкторії розвитку об'єкта управління відповідно до встановлених цільових параметрів.

Процесний підхід передбачає використання алгоритму для переходу об'єкта управління з поточного стану до цільового. Імовірність досягнення цільових параметрів об'єкта управління в цільовому стані служить критерієм якості вибору та впровадження ОТР, включає сукупність операцій та послідовність усіх процесів, спрямованих на досягнення цільових параметрів будівельного процесу.

Графічно послідовність реалізації організаційно-технологічних рішень, спрямованих на досягнення цільових (якісних) показників та усунення наслідків ризиків (дефектів, втрат) можна уявити як ланцюг функціональних блоків окремих процесів (вузлів), який передбачає трансформацію параметрів керівного впливу. Ці параметри визначають як обсяг витрачених матеріально-технічних ресурсів для досягнення цільового стану об'єкта управління:

$$\Omega_\delta^\Pi = \varphi(\Omega_\delta^\Pi, L_e(t)) \text{ (рис. 1, 2) [1, 6, 8–10].}$$

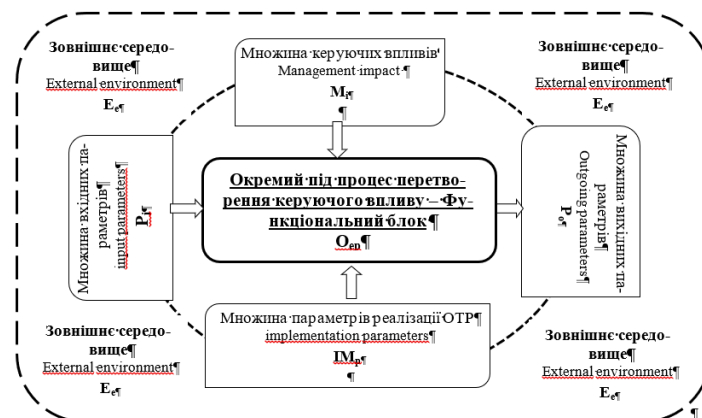


Рис. 1. Схема функціонального блоку окремого підпроцесу керівного впливу ОТР

Fig. 1. Diagram of the functional block of a separate subprocess of the management influence of the organizational and technical solution

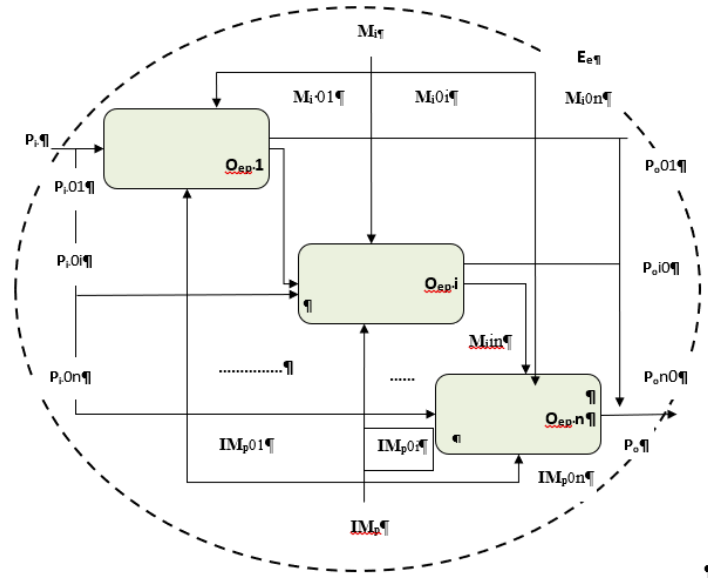


Рис. 2. Узагальнена схема структури процесу керівного впливу організаційно-технологічного рішення

Fig. 2. Generalized diagram of the structure of the process of management influence of an organizational and technological solution

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна цього дослідження полягає в глибокому аналізі механізму вибору організаційно-технологічних рішень для інтегрованого управління будівельними процесами. Вивчено та систематизовано наявні методи та підходи до управління будівельними процесами, а також розглянуто їхню інтеграцію для створення ефективної системи управління.

Одним із ключових наукових досягнень є визначення оптимальних стратегій та методів прийняття рішень у контексті будівельної галузі. Розглянуто не лише технічні аспекти управління, а й організаційні та соціальні взаємодії, що входять до складу інтегрованого підходу. Також важливим аспектом є розробка нових методик вибору оптимальних технологій та організаційних рішень у будівельній сфері, що базуються на передових наукових дослідженнях.

Практична значимість полягає в можливості впровадження рекомендацій та розроблених стратегій у реальні умови будівельної діяльності. Результати дослідження можуть слугувати основою для оптимізації управлінських рішень у будівельних компаніях, забезпечити підви-

щення ефективності виробничих процесів та зменшення ризиків. Крім того, розроблені методики можуть слугувати основою для навчання та підготовки фахівців у галузі будівництва, сприяти підвищенню рівня кваліфікації кадрів у сфері управління будівельними процесами.

Таким чином, наше дослідження є значним внеском у розвиток наукових знань у сфері управління будівельними процесами та має практичне значення для підвищення ефективності будівельної індустрії.

Висновки

З метою ефективного управління будівельними процесами в межах інтегрованого підходу, особливо в умовах невизначеності, необхідно вдосконалювати та впроваджувати загальносистемний алгоритмічний механізм. Цей механізм має визначати та координувати функції управління, забезпечуючи їх паралельне та безперервне виконання в межах окремих процесів. Додатково він повинен здійснювати вибір та прийняття рішень у непередбачуваних ситуаціях, забезпечувати це мінімальним часом втручання.

Для досягнення цих цілей необхідно вимагати відповідності кожного організаційно-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

технологічного рішення встановленим критеріям та розробляти механізми порівняння для обрання найбільш ефективних варіантів із точки зору нівелювання ризиків та досягнення ефективності. Також важливо враховувати вплив на якісні показники, реалізацію за часом, компетентність і технологічні можливості.

Згідно з вищезазначеним, функціональна структура системно-інтегрованого підходу до вибору організаційно-технологічних рішень, призначених для досягнення параметричних

критеріїв як цільових показників управління будівельними процесами в умовах невизначеності, встановлює метод структурування управлінських процесів на основі ситуаційної моделі та алгоритму підтримки ухвалених рішень.

Зазначений підхід є конструктивним методом вибору оптимального організаційно-технологічного рішення (ОТР), максимально враховує задані параметри та умови.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анін В. І., Ічетовкін А. О. Механізм вибору організаційно-технологічних рішень на підґрунті інтегрованого управління будівельними процесами. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2021. № 2 (93). С. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.270421.7.736>
2. Бондар О. А., Поколенко В. О., Пилипчук О. Д., Халілов А. Аналітичний базис діяльності підрядного підприємства в сучасному цифровому середовищі. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2021. Т. 1, № 47. С. 87–95. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47\(1\).87-95](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47(1).87-95)
3. Гоц В. В. *Інтегроване управління інформаційним середовищем девелоперських проектів* : автореф. дис. ... к-та. техн. наук. Київ : КНУБА, 2014. 25 с.
4. Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про будівельні норми» щодо удосконалення нормування у будівництві». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/156-20#Text>
5. Заяць Є. І. Розвиток методів оцінки, обґрунтування та вибору раціональних організаційно-технологічних рішень зведення висотних багатофункціональних комплексів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 6 (207). С. 37–44.
6. Ісасенко Д. Методологічні принципи формування системи технічного регулювання у будівництві. *Нові технології в будівництві*. 2018. № 35. С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2018.35.3>
7. Менейлюк О. І., Нікіфоров О. Л. Управлінська і організаційно-технологічна багатовимірність умов будівництва та реконструкції елеваторів. *Нові технології в будівництві*. 2018. № 35. С. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2018.35.2>
8. Омеляненко М., Омеляненко М. Інформаційна модель об'єкта нормування як основа визначення нормативних вимог із застосуванням параметричного методу нормування. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2020. № 58. С. 233–247. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.58.233-247>
9. Рижаків Д., Ваколюк А. С., Федорова Я. Ю., Ревунов О. М., Гижко А. П. Визначення особливостей системоутвірних факторів ціннісно-орієнтованого менеджменту в проектах будівництва. *Управління розвитком складних систем*. 2020. № 43. С. 182–191. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.182-191>
10. Тарасюк В. Г., Белоконь О. Л. Параметричний метод нормування у будівництві. *Наука та будівництво*. 2018. № 4. С. 13–17.
11. Чернишев Д. О., Тугай О. А., Поколенко В. О., Горбач М. В., Малихін М. О., Скакун Є. В. Методичне підґрунття та адміністративно-управлінські засади вдосконалення операційно-виробничої системи та організаційної структури девелоперської компанії. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2019. Т. 2, № 39. С. 34–43.
12. Arutiunian I., Poltavets M., Bondar O., Anin V., Pavlov F. Structural Information Management of Production Systems in Construction. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2020. № Vol. 9, No. 4. P. 4794–4797. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/87942020>
13. Arutiunian I., Radkevic A., Kuznetsov V., Kovalenk M., Skrzyniarz M. Setting Dynamic Problem of Logistic Support of Building Objects by Material Resources Taking into Account Random Factors Affecting Transportation Timing. *Proceedings of 25th International Scientific Conference. Transport Means 2021*. 2021. № 111. P. 1080–1084.

A. O. ICHETOVKIN^{1*}

^{1*}Dep. «Industrial and Civil Engineering», Zaporizhzhia National University, Sobornyi ave., 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (067) 625 57 92, e-mail artem.ichetovkin72@gmail.com, ORCID 0000-0002-5894-5168

Analysis of the Mechanism for Selecting Organizational and Technological Solutions for Integrated Management of Construction Processes

Purpose. The main purpose of this article is to thoroughly substantiate the possibilities of implementing a mechanism for selecting organizational and technological solutions to achieve parametric criteria for managing construction processes, especially under conditions of uncertainty. To achieve this goal, we use a functional model of the system-integrated approach, which allows us to systematize and coordinate management functions at the level of individual processes. **Methodology.** The study is based on the introduction of new requirements for standardization in the construction industry, in particular, on the use of the parametric method. This method can improve management strategies, methods, and technologies, as well as facilitate the implementation of innovative organizational and technological solutions. As a result, the quality and volume of construction can be improved, which, in turn, will help overcome the crisis and develop the construction industry. The management process involves achieving a key goal, namely the efficiency of project implementation, while construction has certain specifics that complicate the management process and require the use of more complex, integrated, and multi-directional organizational and technological solutions. **Findings.** In the current economic environment, which provides for both an increase in the number of risks in the construction sector and the size of their possible consequences, in the context of increasing (expanding the list) of quality requirements for construction projects, there is a reasonable need to search for and improve organizational and technological solutions in order to apply new approaches to the management of construction processes related to the practical implementation of the results of modern scientific and methodological research. The results obtained, however, indicate that the use of the parametric method creates new challenges for the efficiency of management in the construction industry. The increased number of management decision alternatives, identification of risks and improvement of consequence forecasting processes may cause certain difficulties. On the other hand, the lack of clear requirements can lead to increased costs and risks. **Originality.** The paper substantiates the necessity of using a system-wide algorithmic mechanism for the effective management of construction processes under conditions of uncertainty. This is important for adapting to modern challenges and ensuring the sustainable development of the construction industry. **Practical value.** The study makes it possible to determine the compliance of organizational and technological solutions with the established criteria and compare them to select the most effective one, in particular in terms of cost, efficiency and risk mitigation.

Keywords: management of construction processes; rationing; parametric method; integrated approach; process approach; situational approach; mechanism for selecting organizational and technological solutions

REFERENCES

1. Anin, V. I., & Ichetovkin, A. O. (2021). Mechanism for choosing organizational and technological solutions based on integrated management of the construction process. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 2(93), 7-14. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.pmhtm.2413.270421.7.736> (in Ukrainian)
2. Bondar, A. A., Pokolenko, V. O., Pilipchuk, O. D., & Khalilov, A. (2021). Analytical basis of the contracting enterprise's activity in the modern digital environment. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 1(47), 87-95. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47\(1\).87-95](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2021.47(1).87-95) (in Ukrainian)
3. Hots, V. V. (2014). *Intehrovane upravlinnya informatsiynym seredovyshchem developers'kykh proektiv* (Extended abstract of PhD dissertation). Kyiv: KNUBA. (in Ukrainian)
4. *Zakon Ukrainy «Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukrainy «Pro budivel'ni normy» shchodo udoskonalennya no-rmuvalnnykh u budivnytstvi»*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/156-20#Text> (in Ukrainian)
5. Zayats, Ye. I. (2015). Development of methods of the assessment, substantiation and choice of rational organizational and technological decisions of construction of high-rise multifunctional complexes. *Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 6(207), 37-44. (in Ukrainian)
6. Isayenko, D. (2018). Methodological principles of forming a system of technical regulation in construction. *New Technologies in Construction*, 35, 17-20. DOI: <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2018.35.3> (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. Meneyliuk, O. I., & Nikiforov, O. L. (2018). Management and organizational-technological multidimensionality of conditions for building and reconstruction of grain elevators. *New technologies in construction*, 35, 11-16. DOI: <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2018.35.2> (in Ukrainian)
8. Omelianenko, M., & Omelianenko, M. (2020). Information model of the standardization object as the basis of determination of normative requirements with application of parametric standardization method. *Current Problems of Architecture and Urban Planning*, 58, 233-247. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.58.233-247> (in Ukrainian)
9. Ryzhakov, D., Vakolyuk, A., Fedorova, Y., Revunov, O., & Gizhko, A. (2020). Determining the features of system-forming factors of value-oriented management in construction projects. *Management of Development of Complex Systems*, 43, 182-191. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.182-191> (in Ukrainian)
10. Tarasyuk, V. H., & Byelokon, O. L. (2018). Parametric standartization method in construction. *Science and construction*, 4, 13-17. (in Ukrainian)
11. Chernyshev, D., Tugay, A., Pokolenko, V., Gorbach, M., Malykhin, M., & Skakyn, E. (2019). Methodical basis and administrative and managerial bases for improving the operational and production system and organizational structure of a development company. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 39(2), 34-43. (in Ukrainian)
12. Arutiunian, I., Poltavets, M., Bondar, O., Anin, V., & Pavlov, F. (2020). Structural Information Management of Production Systems in Construction. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9(4), 4794-4797. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/87942020> (in English)
13. Arutiunian, I., Radkevic, A., Kuznetsov, V., Kovalenk, M., & Skrzyniarz, M. (2021). Setting Dynamic Problem of Logistic Support of Building Objects by Material Resources Taking into Account Random Factors Affecting Transportation Timing. In *Proceedings of 25th International Scientific Conference. Transport Means 2021* (No. 11, pp. 1080-1084). (in English)

Надійшла до редколегії: 01.08.2023

Прийнята до друку: 11.12.2023

УДК 69:658.567

А. А. ШУВАЄВ^{1*}

^{1*}Каф. «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (096) 180 45 99, ел. пошта shywazp@gmail.com, ORCID 0000-0002-4919-485X

Інструментарій залучення відходів будівництва та зносу до повторного виробничого циклу

Мета. У цій роботі передбачено проведення аналізу та класифікації відходів будівництва та зносу. Необхідно, щоб ця класифікація не лише відображала статистичні дані про утворення відходів, але і виступала інформаційним фундаментом для системи комплексного управління потоками відходів (СКУПВ). Основне завдання цієї системи полягає в максимальному залученні відходів до повторного господарського обігу та об'єктивному відображенні технологічних можливостей їх переробки. Це надзвичайно важливо в контексті впровадження європейських принципів управління відходами та реалізації Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року. **Методика.** Розглянуто проблеми управління відходами будівництва в межах Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, у якій передбачено впровадження заходів та принципів поводження з відходами, включаючи будівельні відходи. Проаналізовано управлінські проблеми у сфері відходів будівництва та зносу, що обґрунтовує необхідність класифікації відходів будівництва з одночасним узгодженням методів та технологій переробки. Будівельна діяльність невіддільно пов'язана з управлінням різноманітними видами ресурсів, серед яких вторинні матеріали відіграють ключову роль у реалізації будівельних процесів. Здатність ефективно управляти потоками цих вторинних ресурсів є критичною для забезпечення стабільності та ефективності будівельного виробництва. У цьому контексті дослідження значення управління потоками вторинних ресурсів стає невід'ємною частиною стратегії оптимізації будівельних процесів. **Результати.** Будівельні відходи від зносу будинків та споруд є унікальним, що пов'язано з їхньою габаритністю та необхідністю підготовки до первинного дроблення. Це особливо актуально в контексті впровадження концепції реновації застарілого житлового фонду. Досліджено різні статичні та динамічні методи руйнування будівельних матеріалів, зокрема, ударні та вібраційні, при цьому динамічні методи відзначаються меншими енергетичними витратами. **Наукова новизна.** Робота відображає формування теоретико-методологічних напрямів на основі використання вторинної сировини в будівництві, а також проведення порівняльної характеристики різних методів руйнування будівельних матеріалів. **Практична значимість.** Можливості переробки відходів будівництва, зокрема максимальне залучення їх до переробки, що відповідає цілям Стратегії України, забезпечує 50 % перероблення відходів.

Ключові слова: управління потоками відходів будівництва і зносу; класифікація; технологія переробки; вторинна сировина

Вступ

Неможливо заперечити, що відходи будівельної галузі мають значний потенціал для перетворення на вторинну сировину. Після відповідної переробки вони можуть бути використані як вторинна продукція за визначеними технологіями. Це не лише знижує собівартість будівельних проєктів, але й сприяє зменшенню навантаження на полігони, уникненню неконтрольованого розширення нелегальних сміттєзвалищ [1–3, 5]. Зазначимо, що внаслідок переробки відходів від демонтажу споруд за прогресивними екологічно спрямованими інноваційними технологіями ефективність

використання матеріалів зростає за рахунок зниження виробничих витрат будівництва.

Незважаючи на доведені науково-теоретичні дослідження та практичний досвід багатьох іноземних країн, переваги використання відходів будівництва в повторному господарському обігу [7–10, 12] залишаються недостатньо врахованими, особливо в Україні. Однією з причин цього є недостатність та недосконалість теоретичних та практичних розробок методів і технологій використання відходів будівництва та демонтажу як вторинної сировини.

Через відсутність чіткої класифікації, системи контролю та достовірних статистичних даних про обсяги утворення й переробки будівельних відходів в Україні важко визначити

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

реальний обсяг захоронення на сміттєзвалищах. Можна припускати, що вказана цифра (94 %) відображає обсяги захоронення усіх твердих побутових відходів [2].

Мета

Основна мета цієї наукової статті полягає в науковому обґрунтуванні класифікації відходів будівництва, яка б не лише відображала статистичні показники їх утворення, але й слугувала інформаційним фундаментом для системи комплексного управління потоками відходів (СКУПВ), була спрямована на досягнення максимального залучення цих відходів до повторного господарського обігу та об'єктивно відображала технологічні можливості їх переробки. Це важливо в контексті впровадження принципів поводження з відходами, які ґрунтуються на європейських стандартах, та реалізації Національної стратегії управління відходами в Україні.

Методика

Згідно з даними Євростатуту, будівельні відходи становлять приблизно третину загальної кількості відходів у країнах Європейського Союзу. Основні складові будівельних відходів – ґрунт, бетон, цегла, скло, деревина, гіпсокартон, азбест, метали, пластмаси та інші матеріали. Рівень переробки цих відходів у країнах ЄС коливається від 10 до 90 % [8].

У Нідерландах, наприклад, більшість будівельних відходів (понад 90 %) проходить процес переробки, що становить найвищий показник у Європі. У Німеччині функціонує понад 400 підприємств-переробників будівельних відходів (100 переробних центрів лише в Берліні); із загальної маси 59 мільйонів тонн будівельного лому, утвореного на будівельних майданчиках, 80 % повторно використовують [7, 8].

В Австрії майже 87 % відходів будівництва та зносу (CDW – Construction and Demolition Waste) піддають переробці. Обов'язковою умовою є роздільний збір, який регулюють на законодавчому рівні. Приблизно 54 % компаній, які входять до Австрійської асоціації з переробки будівельних матеріалів (108 компаній), працюють у мобільному форматі, використовуючи дробильні та екранні установки, тоді як

46 % є стаціонарними (мають декілька модулів, які можуть бути компонованими). Стимулювання переробки будівельних відходів та зносу відбувається на законодавчому рівні, наприклад, через Закон про усунення забруднених територій, що передбачає стягнення 9,2 євро за кожну тону невідновлюваних відходів (тобто тих, які не підлягають переробці або неможливо переробити) [5–8].

Загалом у країнах ЄС середній рівень переробки будівельних відходів становить практично 28 % [7], і частка вторинної будівельної сировини вказує на позитивну динаміку, яка є результатом не лише заходів стимулювання, але й упровадження інноваційних технологій та сучасних організаційно-технологічних рішень для ефективного залучення відходів будівництва до повторного господарського обігу.

В управлінні потоками відходів будівництва ключовим аспектом є розмаїття будівельних відходів за їхнім походженням та морфологічним складом, що визначає варіативність методів їх збору, транспортування, передпідготовки та подальшої переробки. Згідно з цим підходом можна виділити дві основні групи відходів: перша група – відходи, що утворюються під час реконструкції, ремонту, нового будівництва, виробництва будівельних матеріалів, деталей і конструкцій; друга група – відходи від зносу будівель та споруд [9].

Крім того, класифікація будівельних відходів [2, 9] за джерелами їх утворення передбачає уточнення розподілу за такими категоріями: відходи від виробництва будівельних матеріалів і конструкцій; відходи, утворені в процесі поточних ремонтів; відходи від капітальних ремонтів; відходи, отримані під час модернізації та реконструкції; відходи від реставрації; відходи в результаті зносу споруд та будинків; відходи, утворені в процесі нового будівництва; відходи під час випробувань; відходи внаслідок надзвичайних ситуацій.

Однак наявні класифікація відходів будівництва в Державному класифікаторі України (ДК 005–96) [2, 3], яка визначає їх як відходи від надання послуг Б.3, групи 45, утворені під час будівельних робіт та знесення будівель і споруд (451), а також унаслідок техногенних та природних катастроф, не відображає всієї різноманітності відходів будівництва та зносу,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

вимагає більш диференційованого підходу до їх технологічної обробки. Різні дослідження, зокрема [9], розглядають здатність відходів до повторного використання як критерій класифікації, виокремлюючи кондиційні, некондиційні відходи та будівельне сміття [5].

Кондиційні відходи являють собою конструктивні елементи, вироби та матеріали, які можуть бути повторно використані. Некондиційні відходи підходять для вторинної переробки, тоді як будівельне сміття призначене лише для захоронення. Зазначимо, що в деяких дослідженнях [2, 6, 7, 11] наголошено на тому, що кондиційні вироби та матеріали повинні бути виключені з категорії будівельних відходів через їхню здатність збереження первісних властивостей та можливість використання згідно з призначенням. Варто відзначити, що в деяких європейських країнах ці матеріали класифікують як вторинну сировину, а не як відходи будівництва.

Автори поділяють відходи будівництва та зносу на дві групи: першу групу визначають як вторинну сировину, а другу – як будівельні відходи. З цієї класифікації випливають три основні методи обробки відходів будівництва та зносу:

- захоронення;
- утилізація з використанням відходів як вторинної сировини;
- утилізація з отриманням енергії.

Ця класифікація зорієнтована на технологічний склад відходів, її використовують для оцінки їхньої екологічної безпеки та можливості використання як вторинної сировини. Також відходи будівництва класифікують за їхнім походженням на органічні, мінеральні та хімічні [6, 9].

Очевидно, що основний відсоток утворення відходів у будівельній галузі становлять відходи, які виникають під час реконструкції, ремонту, нового будівництва, а також виробництва будівельних матеріалів, деталей і конструкцій. Ці відходи характеризуються розрізненими місцями утворення та вимагають більш складного сортування, що ускладнює як логістичний процес управління такими потоками, так і визначення технологічних вимог для їхньої переробки з метою отримання максимальної споживчої

цінності для окремих видів відходів. Наприклад, під час розбирання 100-квартирного будинку в середньому може утворюватись від 15 до 20 тонн відходів будівництва, включаючи цеглу, залишки твердого бетону, стінові блоки з керамзитобетону, гіпсокартон, пінопласт, мінеральну вату, скло та інше [1, 8]. Очевидно, що класифікація цих відходів повинна враховувати не тільки джерело їх утворення, але і склад (визначення продукції) первісного будівельного матеріалу. Це надасть можливість, у разі застосування конкретних технологій, отримати продукцію з вторинної сировини з найбільшою споживчою цінністю та найвищою ефективністю переробки.

Відходи будівництва, що виникають під час зносу будинків та споруд, також мають свою унікальність, яка пов'язана з їхнім розміром, потребою в підготовці до первинного подрібнення та мінімальними вимогами до двоступеневого роздроблення. Ця унікальність спричиняє в основному направлення цих відходів на стаціонарні комплекси переробки через обмежені можливості їх обробки на місці утворення [9]. Це особливо актуально в контексті впровадження концепції реновації застарілого житлового фонду. Розрізняють статичні методи руйнування, такі як розколювання, дроблення, різка та розширення, і динамічні методи, зокрема ударні, вібраційні та вибухові. Динамічні методи руйнування отримали найбільше вдосконалення та відрізняються меншими питомими енергетичними витратами порівняно зі статичними методами.

У світовій практиці в основному використовують два основних підходи до організації переробки важких та габаритних будівельних відходів: переробка на місці утворення та переробка на спеціалізованих підприємствах-переробниках (спеціальних комплексах) [10, 11].

Перший варіант переробки обмежує можливості використання високопродуктивного обладнання, отримання чистої фракційної продукції з відходів будівництва та вимагає додаткових екологічних заходів для захисту навколишнього середовища, особливо в міських зонах.

Другий варіант передбачає додаткові логістичні витрати на процес переробки. Це дає можливість отримувати продукцію з вищою дода-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ною вартістю, реалізовувати інноваційні організаційно-технологічні рішення та забезпечувати екологічність процесів переробки.

Найбільш екологічно доцільним методом утилізації будівельних відходів залишається той, при якому частину відсортованих відходів обробляють на місці (локального) збору та розбирання, а іншу направляють до стаціонарних центрів переробки [3, 5, 9].

Можливості використання будівельних відходів у системному управлінні організаційно-технологічною надійністю виробничих процесів в будівництві [4], можна поділити на дві групи:

перша група включає відходи, які не потребують високої якості вторинної сировини (відходи будівництва). Використання таких відходів дозволяє зекономити цінну та високоякісну первинну сировину без значного впливу на якість кінцевого продукту (наприклад, шумопоглинальні огороження, забутування споруджень, подушка для доріг та ін.);

друга група включає відходи, де висувають вимоги до якості і складу вторинної сировини, а самі відходи мають більшу цінність. Такі відходи можуть бути використані як вторинна сировина для нових будівельних (і не тільки) матеріалів (будівельні матеріали з використанням повністю або частково вторинної сировини). Ефективними методами такого використання будівельних відходів є рециклінг, регенерація та рекуперація.

Результати

Отже, ми вважаємо абсолютно обґрунтованим включення максимальної кількості будівельних відходів до процесу переробки. Класифікацію будівельних відходів потрібно здійснювати за кількома ключовими параметрами:

1. За видами будівельних матеріалів: розділення за матеріалами, такими як скло, бетон, цегла, деревина, гіпсокартон і т. д.

2. За кондиційністю: розподіл на кондиційні, некондиційні та непереробні відходи.

3. За придатністю до переробки відповідно до видів технологій: поділ відходів за доступними технологіями (технологія 1, технологія 2 і т. д.).

4. За габаритністю: умови сортування та транспортування, наприклад, групування за

умовами сортування та транспортування 1, 2 і т. д.

5. За критеріями безпеки: урахування чотирьох існуючих класів безпеки відходів.

6. За джерелами утворення: визначення джерел утворення відходів.

Удосконалення цієї класифікації дозволить систематизувати всі типи будівельних відходів не лише для отримання статистичних даних щодо обсягів їхнього утворення, але й для сортування в межах інформаційної системи управління потоками відходів, створення єдиної інформаційної платформи [2, 3, 9]. Це, у свою чергу, надасть можливість прогнозувати обсяги переробки, кількість готової продукції з перероблених відходів та оцінювати ефективність управління потоками відходів будівництва та зносу взагалі.

Важливо відзначити, що з розширенням технологічних можливостей та впровадженням нових технологій переробки буде розширюватися і класифікація відходів будівництва за цим принципом (рис. 1). Це відкриє нові можливості для залучення тих відходів, які раніше, наприклад, не підлягали переробці.

Наукова новизна та практична значимість

Результати наукової роботи, які наведені в цій статті, дозволяють поліпшити процеси управління потоками вторинних ресурсів, що сприяє не лише підвищенню ефективності використання ресурсів, але й зменшенню впливу будівельних процесів на навколишнє середовище. Застосування структури функціональних можливостей інформаційно-аналітичної системи управління відходами будівництва дозволяє точно визначати обсяги вторинних ресурсів, їх якість та придатність для конкретних будівельних завдань.

Крім того, управління потоками вторинних ресурсів є ключовим елементом у стратегіях сталого будівництва, що спрямовані на зменшення відходів та енергозатрат, а також на підвищення переробної здатності матеріалів. Це відкриває нові перспективи для створення екологічно чистих та енергоефективних будівельних об'єктів.

Тому управління потоками вторинних ресурсів у будівництві є актуальною та перспектив-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ною науковою проблемою. Урахування аспектів алгоритму програмного модуля визначення системи комплексного управління потоками відходів (СКУПВ) будівельної галузі та їх

практичне впровадження сприяє підвищенню ефективності будівельних процесів та розвитку сталого будівництва.

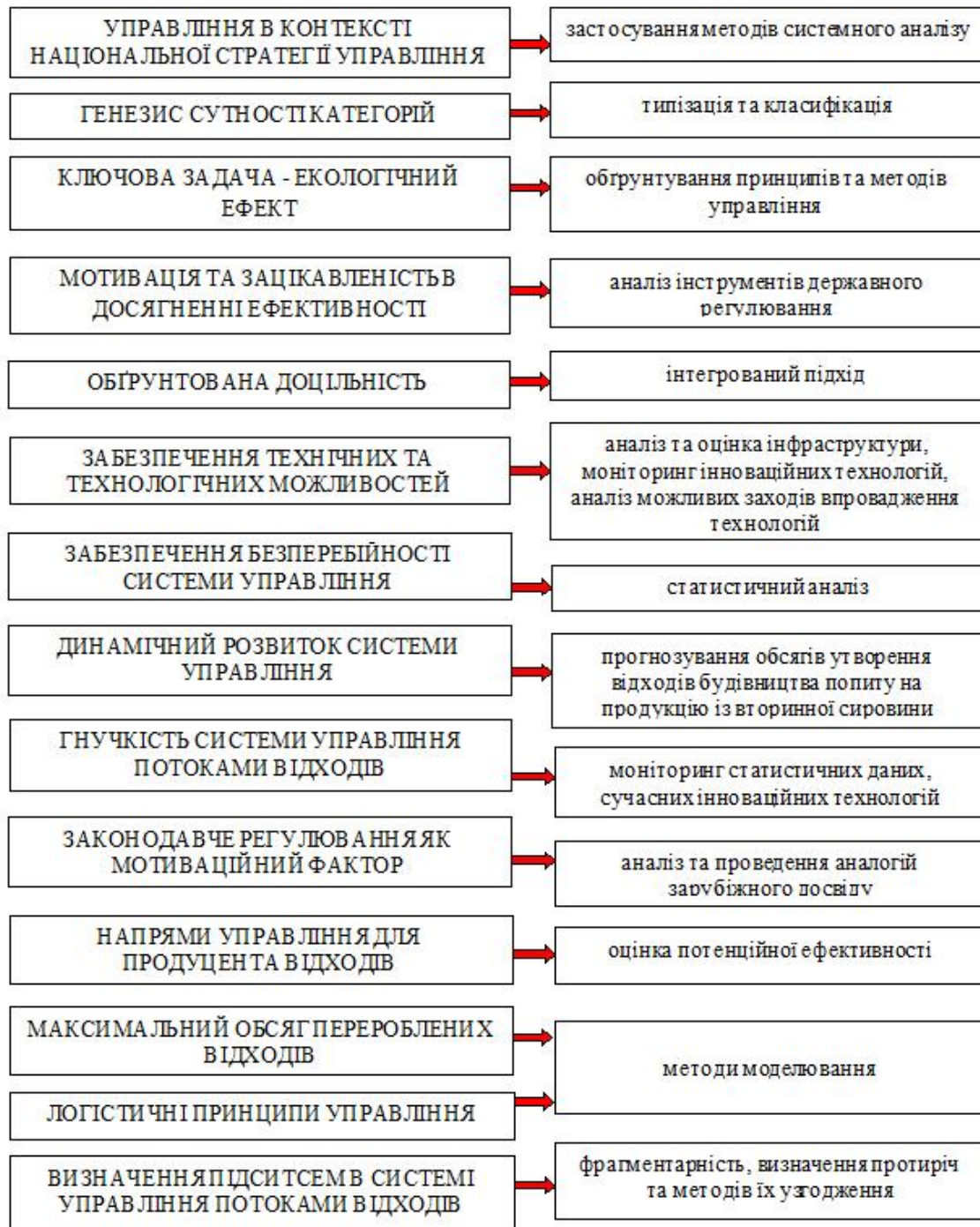


Рис. 1 . Обґрунтування доцільності створення системи комплексного управління потоками будівельних відходів як вторинної сировини

Fig. 1 . Rationale for creating a system of integrated management of construction waste flows as secondary raw materials

Висновки

Проаналізовано тенденції управління потоками вторинних ресурсів у будівельній галузі, що визначає науково-прикладну необхідність проведення досліджень у розрізі політики збереження матеріалів та зменшення енергетичних витрат, а також забезпечення екологічної, економічної та соціальної безпеки регіонів, підвищення економічної ефективності виробництва за рахунок використання інтенсивних факторів, що дозволяють збільшити обсяг національного доходу з мінімальними капітальними вкладеннями, зниження матеріальних витрат у загальній собівартості створення кінцевого продукту будівництва.

Отже, врахування потенціалу обробки відходів будівництва та стратегічної мети ефективного управління потоками відходів будівництва в рамках системи комплексного управління потоками відходів (СКУПВ), що передбачає максимальне залучення цих відходів до переробки, сприяє:

класифікації та вивченню корисності відходів будівництва для прогнозування можливих напрямів їх використання;

розробці та впровадженню технологій переробки різних видів відходів будівництва та зносу, із фокусом на мінімізації витрат та дотриманні екологічних стандартів;

установленню економічно обґрунтованих сфер застосування різних технологічних схем переробки відходів будівництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арутюнян І. А., Шуваєв А. А. Екологічно-економічна доцільність комплексного управління потоками відходів в будівельній галузі. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2020. № 18. С. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/217692>
2. Державний класифікатор України. *Класифікатор відходів ДК 005-96*. URL: <http://plast.vn.ua/DK005-96.html>
3. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. *Екологічний паспорт Запорізької області за 2020 рік*. URL: https://www.zoda.gov.ua/files/WP_Article_File/original/000142/142094.pdf
4. Павлов І. Д., Полтавець М. О., Павлов Ф. І. Системне управління організаційно-технологічною надійністю виробничих процесів в будівництві. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2020. № 17. С. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205011>
5. «Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року». Розпорядження Кабінету міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
6. Розпорядження Кабінету міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р. «Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
7. Рыщенко М. И., Федоренко Е. Ю., Лисачук Г. В., Шабанова Г. Н. Техногенные материалы и промышленные отходы как источник сырья для производства строительных материалов. *Экология и промышленность*. 2013. № 4. С. 10–16.
8. Фісуненко П., Герасимова О. Напрями зменшення ризиків воєнного екоциду за допомогою рециклінгу будівельних відходів в девелопменті нерухомості. *Економіка та суспільство*. 2022. № 45. С. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-41>
9. Шуваєв А. Інструментарій залучення відходів будівництва та зносу до повторного господарського циклу в контексті їх класифікаційних ознак. *Грааль науки*. 2021. № 10. С. 600–605. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.11.2021.114>
10. Li H., Chen Z., Yong L., Kong S. C. W. Application of integrated GPS and GIS technology for reducing construction waste and improving construction efficiency. *Automation in Construction*. 2005. Vol. 14. Iss. 3. P. 323–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.08.007>
11. Pradhananga N., Teizer J. Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data. *Automation in Construction*. 2013. Vol. 29. P. 107–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.004>

12. Puskás A., Corbu O., Szilágyi H., Moga L. M. Construction waste disposal practices: The recycling and recovery of waste. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2014. Vol. 191. P. 1313–1321. DOI: <https://doi.org/10.2495/sc141102>

A. A. SHUVAEV^{1*}

^{1*}Dep. «Industrial and Civil Engineering», Zaporizhzhia National University, Sobornyi ave., 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (096) 180 45 99, e-mail shywazp@gmail.com, ORCID 0000-0002-4919-485X

Tools for the Involvement of Construction and Demolition Waste in the Repeated Production Cycle

Purpose. This paper aims to analyze and classify construction and demolition waste. It is necessary that this classification not only reflects statistical data on waste generation, but also serves as an information basis for the integrated waste management system (IWMS). The main task of this system is to maximize the involvement of waste in economic recycling and to objectively reflect the technological capabilities of its processing. This is extremely important in the context of the implementation of European waste management principles and the implementation of the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030. **Methodology.** The article considers the problems of construction waste management within the framework of the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030, which provides for the implementation of measures and principles of waste management, including construction waste. The author analyzes the management problems in the field of construction and demolition waste, which substantiates the need to classify construction waste with the simultaneous harmonization of processing methods and technologies. Construction activities are inextricably linked to the management of various types of resources, among which secondary materials play a key role in the implementation of construction processes. The ability to effectively manage the flows of these secondary resources is critical to ensuring the sustainability and efficiency of construction production. In this context, the study of the importance of managing the flows of secondary resources becomes an integral part of strategies for optimizing construction processes. **Findings.** Construction waste from the demolition of buildings and structures is unique due to its size and the need to prepare it for primary crushing. This is especially true in the context of implementing the concept of renovation of the outdated housing stock. Various static and dynamic methods of destruction of building materials, in particular, impact and vibration, have been investigated, with dynamic methods being characterized by lower energy consumption. **Originality.** The work reflects the formation of theoretical and methodological directions based on the use of recycled materials in construction, as well as a comparative characterization of various methods of destruction of building materials. **Practical value.** The possibilities of recycling construction waste, in particular, their maximum involvement in recycling, which meets the goals of the Strategy of Ukraine, provides 50% of waste recycling.

Keywords: management of construction and demolition waste streams; classification; recycling technology; secondary raw materials

REFERENCES

1. Arutiunian, I. A., & Shuvaev, A. A. (2020). Environmentally-economic feasibility of integrated management of waste flows in the construction industry. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 18, 9-17. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/217692> (in Ukrainian)
2. *Derzhavnyy klasyfikator Ukrayiny. Klasyfikator vidkhodiv DK 005-96*. Retrieved from <http://plast.vn.ua/DK005-96.html> (in Ukrainian)
3. *Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Environmental passport of Zaporizhzhia region for 2020*. Retrieved from https://www.zoda.gov.ua/files/WP_Article_File/original/000142/142094.pdf (in Ukrainian)
4. Pavlov, I. D., Poltavets, M. O., & Pavlov, F. I. (2020). System management of organizational-technological reliability of production processes in building. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 17, 53-61. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205011> (in Ukrainian)
5. «Pro skhvalennya Natsional'noyi stratehiyi upravlinnya vidkhodamy v Ukrayini do 2030 roku». *Rozporядzhennya Kabinetu ministriv Ukrayiny vid 8 lystopada 2017 r. No 820-r*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text> (in Ukrainian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

6. *Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated November 8, 2017 No. 820-p. «On Approval of the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030»*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text> (in Ukrainian)
7. Ryshchenko, M. I., Fedorenko, E. Y., Lisachuk, G. V., & Shabanova, G. N. (2013). Tekhnogennyye materialy i promyshlennyye otkhody kak istochnik syr'ya dlya proizvodstva stroitelnykh materialov. *Ecology and industry*, 4, 10-16. (in Russian)
8. Fisunen, P., & Herasymova, O. (2022). Ways to reduce the risks of military ecocide through recycling of construction waste in real estate development. *Economy and Society*, 45, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-41> (in Ukrainian)
9. Shuvaev, A. (2021). Instrumentariy zaluchennya vidkhodiv budivnytstva ta znosu do povtornoho hospodars'koho tsykladu v konteksti yikh klasyfikatsiynykh oznak. *Grail of Science*, 10, 600-605. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.11.2021.114> (in Ukrainian)
10. Li, H., Chen, Z., Yong, L., & Kong, S. C. W. (2005). Application of integrated GPS and GIS technology for reducing construction waste and improving construction efficiency. *Automation in Construction*, 14(3), 323-331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.08.007> (in English)
11. Pradhananga, N., & Teizer, J. (2013). Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data. *Automation in Construction*, 29, 107-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.004> (in English)
12. Puskás, A., Corbu, O., Szilágyi, H., & Moga, L. M. (2014). Construction waste disposal practices: the recycling and recovery of waste. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 191, 1313-1321. DOI: <https://doi.org/10.2495/sc141102> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.08.2023

Прийнята до друку: 08.12.2023

Тематичний покажчик журналу «Наука та прогрес транспорту»
за 2023 рік

Назва статті	№ журналу	Стор.
Автоматизовані системи управління на транспорті		
<i>К. Л. КОСТЕНКО, Т. М. СЕРДЮК, В. В. СКАЛЬКО</i> Роботизація діагностики систем залізничної автоматики та зв'язку	3	5
<i>Т. М. СЕРДЮК, М. С. СЕРЧЕНКО</i> Аналіз параметрів якості електричної енергії та пристроїв для їх вимірювання	3	13
Екологія та промислова безпека		
<i>М. М. БІЛЯЄВ, Ю. В. БРАЗЛУК, П. С. КІРІЧЕНКО, П. Б. МАШИХІНА, А. С. КОВАЛЕНКО</i> Комп'ютерне 3D моделювання процесу очищення стічних вод у відстійнику	4	5
Експлуатація та ремонт засобів транспорту		
<i>Б. Є. БОДНАР, О. Б. ОЧКАСОВ, Є. Б. БОДНАР</i> Визначення періодичності діагностування вузлів гідравлічної передачі тепловозів	1	5
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси		
<i>С. В. ВОЙТКІВ</i> Розроблення й аналіз інноваційної компоувальної схеми зчленованого двосекційного трамвайного вагона	1	16
<i>В. Ю. СКОСАР, С. В. БУРИЛОВ, В. О. ДЗЕНЗЕРСЬКИЙ</i> Деякі проблеми надшвидкісних транспортних технологій	2	5
<i>О. С. ШАПОВАЛОВ</i> Система взаємного навантаження допоміжних електричних машин з покриттям втрат від джерел механічної потужності	3	24
Залізнична колія та автомобільні дороги		
<i>М. Б. КУРГАН, М. А. ГУСАК, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА</i> Мінімізація смуги відведення земель під час ландшафтного проектування автомобільної дороги	2	17
<i>О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ, М. Б. КУРГАН, М. А. ГУСАК, В. І. УЛАНОВСЬКИЙ</i> Відновлення дорожнього покриття залежно від ступеня руйнування автомобільної дороги	2	29
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання		
<i>О. П. ІВАНОВ, В. І. ШИНКАРЕНКО, В. В. СКАЛОЗУБ, А. А. КОСОЛАПОВ</i> Визначення авторства художнього україномовного тексту засобами штучного інтелекту за надкороткими уривками	2	45
<i>В. В. СКАЛОЗУБ, В. М. ГОРЯЧКІН, І. А. ТЕРЛЕЦЬКИЙ</i> Інтелектуальна технологія оптимізації керування потоками замовлень сервісних систем із неточно визначеними і природномовними даними	2	54

Назва статті	№ журналу	Стор.
<i>В. І. ШИНКАРЕНКО, І. М. ДЕМИДОВИЧ, О. С. КУРОП'ЯТНИК</i> Подвійний підхід до встановлення авторства технічних природномовних текстів та їх складових	2	71
<i>І. М. ДЕМИДОВИЧ</i> Методи інтелектуального аналізу тексту	3	44
<i>В. В. СКАЛОЗУБ, В. М. ГОРЯЧКІН, І. В. КЛИМЕНКО, О. В. МУРАШОВ</i> Комплексні багатовимірні нечіткі моделі процесів моніторингу та реабілітації хворих із нерівномірним інтервалом спостережень	3	44
Матеріалознавство		
<i>Ш. М. АХАДЗАДЕ, І. О. ВАКУЛЕНКО, Х. АСГАРОВ</i> Фактори впливу на електрофізичні параметри композитних варисторів	1	29
Машинобудування		
<i>В. В. НОВОДВОРСЬКИЙ, Г. К. ІВАНИЦЬКИЙ</i> Моделювання течії розплаву полімеру в кільцевому каналі дискового екструдера	1	37
<i>В. В. НОВОДВОРСЬКИЙ, Г. К. ІВАНИЦЬКИЙ, М. П. ШВЕД</i> Моделювання неізотермічної течії розплаву полімеру в конусному кільцевому каналі дискового екструдера	2	89
<i>ОЛЕК. С. КУРОП'ЯТНИК, М. Ю. ШАРАПОВ</i> Обґрунтування геометричних параметрів шківів змінного моменту інерції	2	96
<i>В. М. БОГОМАЗ, П. Г. АНОФРІЄВ</i> Дослідження впливу проектних параметрів вібраційного конвеєра на його технічні характеристики	3	60
Рухомий склад і тяга поїздів		
<i>А. М. АФАНАСОВ, С. М. ГОЛІК, С. Ю. БУРЯК, О. Г. КРАВЧУНОВСЬКИЙ, Є. Ф. ФЕДОРОВ, О. О. ГОЛОЛОБОВА</i> Моделювання процесу зношування колісної пари локомотива та рейки під час буксування у кривій	1	47
<i>Г. Л. ВАТУЛЯ, А. О. ЛОВСЬКА, С. С. МЯМЛІН, Є. С. КРАСНОКУТСЬКИЙ</i> Обґрунтування конструкційних особливостей сендвіч-панелей для виготовлення стінок контейнера	1	55
<i>Л. А. МУРАДЯН, О. В. КУЧКОВА, Н. М. ЧУПРИНА, Г. Є. ДОЦЕНКО, В. В. ЖУРАВЕЛЬ, Н. Ю. НАУМЕНКО, О. С. СВЕРДЛІКОВСЬКА</i> Використання методів нечіткої логіки для оптимізації вибору постачальників підприємства	2	104
<i>Д. В. БОБИРЬ, Є. Б. БОДНАР, Д. М. КИСЛИЙ, А. Є. ДЕСЯК</i> Визначення параметрів обмеження поздовжнього прискорення для оптимізації витрат енергоресурсів на тягу поїздів	4	13
<i>Д. М. КИСЛИЙ, А. Є. ДЕСЯК, Д. В. БОБИРЬ, Є. Б. БОДНАР</i> Визначення енергооптимізованого керування локомотивом під час розгону поїзда	4	25

Назва статті	№ журналу	Стор.
Транспортне будівництво		
<i>С. І. БЄЛІКОВА, О. Л. ТЮТЬКІН</i> Обґрунтування технології спорудження ескалаторного тунелю на основі результатів натурних досліджень	2	115
<i>А. О. ІЧЕТОВКІН</i> Аналіз механізму вибору організаційно-технологічних рішень інтегрованого управління будівельними процесами	4	39
<i>А. А. ШУВАЄВ</i> Інструментарій залучення відходів будівництва та зносу до повторного виробничого циклу	4	48

Subject index to the journal «Nauka ta Progres Transportu = Science and Transport Progress» for 2023

Article title	Journal number	Page
Automated and Telematic Systems on Transport		
<i>K. L. KOSTENKO, T. M. SERDIUK, V. V. SKALKO</i> Robotization of Diagnostics of Railway Automation and Communication Systems	3	5
<i>T. M. SERDYUK, M. S. SERCHENKO</i> Analysis Of Power Quality Parameters and Devices for Their Measurement	3	13
Ecology and Industrial Safety		
<i>M. M. BILIAIEV, Iu. V. BRAZALUK, P. S. KIRICHENKO, P. B. MASHYKHINA, A. S. KOVALENKO</i> Computer 3D Modeling of the Process of Wastewater Treatment in a Settling Tank	4	5
Operation and Repair of Transport Means		
<i>B. Y. BODNAR, O. B. OCHKASOV, Y. B. BODNAR</i> Determination of the Frequency of Diagnostics of Hydraulic Transmission Units of Diesel Locomotives	1	5
Electric Transport, Power Systems and Complexes		
<i>S. V. VOYTKIV</i> Development and Analysis of an Innovative Layout Scheme of an Articulated Two-Section Tram Tramcar.	1	16
<i>V. YU. SKOSAR, S. V. BURYLOV, V. O. DZENZERSKYI</i> Some Problems of Ultra-High-Speed Transportation Technologies	2	5
<i>O. S. SHAPOVALOV</i> System of mutual loading of auxiliary electric machines with coverage of losses from mechanical power sources	3	24
Railroad and Roadway Network		
<i>M. B. KURHAN, M. A. HUSAK, O. F. LUZHYSKYI, N. P. KHMELEVSKA</i> Minimization of the Land Right-of-Way During the Landscape Design of a Road	2	17
<i>O. F. LUZHYSKYI, M. B. KURHAN, M. A. HUSAK, V. I. ULANOVSKYI</i> Restoration of Road Pavement Depending on the Degree of Destruction of the Road	2	29
Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling		
<i>O. P. IVANOV, V. I. SHYNKARENKO, V. V. SKALOZUB, A. A. KOSOLAPOV</i> Determining the Authorship of a Ukrainian-Language Literary Text by Means of Artificial Intelligence from Ultra-Short Excerpts	2	45
<i>V. V. SKALOZUB, V. M. HORIACHKIN, I. A. TERLETSKYI</i> Intelligent Technology for Optimizing the Management of Order Flows of Service Systems With Imprecisely Defined and Natural Language Data	2	54
<i>V. I. SHYNKARENKO, I. M. DEMIDOVICH, O. S. KUROIPIATNYK</i> A Dual Approach to Establishing the Authority of Technical Natural Language Texts and Their Components	2	71
<i>I. M. DEMIDOVICH</i> Methods of Intellectual Text Analysis	3	31

Article title	Journal number	Page
<i>V. V. SKALOZUB, V. M. HORIACHKIN, I. V. KLYMENKO, O. V. MURASHOV</i> Complex Multidimensional Fuzzy Models of Monitoring and Rehabilitation Processes for Patients with Uneven Observation Interval	3	44
Material Science		
<i>S. M. AHADZADE, I. A. VAKULENKO, K. ASGAROV</i> Influence Factors on Electrophysical Parameters of Composite Varistors	1	29
Mechanical Engineering		
<i>V. V. NOVODVORSKYI, G. K. IVANITSKY</i> Modeling of Polymer Melt Flow in the Annular Channel of a Disk Extruder	1	37
<i>V. V. NOVODVORSKYI, G. K. IVANITSKY, N. P. SHVED</i> Modeling of Non-Isothermal Polymer Melt Flow in a Conical Annular Channel of a Disk Extruder	2	86
<i>Olek. S. KUROIPIATNYK, M. Y. SHARAPOV</i> Substantiation of Geometric Parameters of a Variable Inertia Moment Pulley	2	96
<i>V. M. BOHOMAZ, P. G. ANOFRIEV</i> Research of the Influence of Design Parameters of a Vibrating Conveyor on Its Technical Characteristics	3	60
Rolling Stock and Train Traction		
<i>A. M. AFANASOV, S. M. HOLIK, S. Y. BURIAK, O. H. KRAVCHUNOVSKYI, Y. F. FEDOROV, O. O. GOLOBOVA</i> Modeling of the Wear Process of a Locomotive Wheelset and Rail During Sliding in a Curve	1	47
<i>G. L. VATULIA, A. O. LOVSKA, S. S. MYAMLIN, Ye. S. KRASNOKUTSKYI</i> Substantiation of the Design Features of Sandwich Panels for Container Wall Lining	1	55
<i>L. O. MURODIAN, O. V. KUCHKOVA, N. M. CHUPRYNA, G. YE. DOTSENKO, V. V. ZHURAVEL, N. YU. NAUMENKO, O. S. SVERDLIKOVSKA</i> The Use of Fuzzy Logic Methods to Optimize the Selection of Suppliers of the Enterprise	2	104
<i>D. V. BOBYR, E. B. BODNAR, D. M. KISLIY, A. Y. DESIAK</i> Determination of Parameters for Limiting Longitudinal Acceleration to Optimize Energy Consumption for Train Traction	4	13
<i>D. M. KISLIY, A. Y. DESIAK, D. V. BOBYR, E. B. BODNAR</i> Determination of Energy-Optimized Locomotive Control During Train Acceleration	4	25
Transport Construction		
<i>S. I. BIELIKOVA, O. L. TIUTKIN</i> Substantiation of the Escalator Tunnel Construction Technology Based on the Results of Field Research	2	115
<i>A. O. ICHETOVKIN</i> Analysis of the Mechanism for Selecting Organizational and Technological Solutions for Integrated Management of Construction Processes	4	39
<i>A. A. SHUVAEV</i> Tools for the Involvement of Construction and Demolition Waste in the Repeated Production Cycle	4	48

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**М. М. БІЛЯЄВ, Ю. В. БРАЗАЛУК, П. С. КІРІЧЕНКО,
П. Б. МАШИХІНА, А. С. КОВАЛЕНКО**

Комп'ютерне 3D моделювання процесу очищення стічних вод у відстійнику 5

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Д. В. БОБИРЬ, Є. Б. БОДНАР, Д. М. КИСЛИЙ,
А. Є. ДЕСЯК**

Визначення параметрів обмеження поздовжнього прискорення для оптимізації витрат енергоресурсів на тягу поїздів..... 13

**Д. М. КИСЛИЙ, А. Є. ДЕСЯК, Д. В. БОБИРЬ,
Є. Б. БОДНАР**

Визначення енергооптимізованого керування локомотивом під час розгону поїзда..... 25

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

А. О. ІЧЕТОВКІН

Аналіз механізму вибору організаційно-технологічних рішень інтегрованого управління будівельними процесами 39

А. А. ШУВАЄВ

Інструментарій залучення відходів будівництва та зносу до повторного виробничого циклу 48

ТЕМАТИЧНИЙ ПОКАЖЧИК ЖУРНАЛУ

**«НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ»
ЗА 2023 РІК..... 56**

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

- M. M. BILIAIEV, Iu. V. BRAZALUK,
P. S. KIRICHENKO, P. B. MASHYKHINA,
A. S. KOVALENKO**
Computer 3D Modeling of the Process of Wastewater
Treatment in a Settling Tank 5

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

- D. V. BOBYR, E. B. BODNAR, D. M. KISLIY,
A. Y. DESIAK**
Determination of Parameters for Limiting Longitudinal
Acceleration to Optimize Energy Consumption for Train
Traction 13
- D. M. KISLIY, A. Y. DESIAK, D. V. BOBYR,
E. B. BODNAR**
Determination of Energy-Optimized Locomotive Control
During Train Acceleration..... 25

TRANSPORT CONSTRUCTION

- A. O. ICHETOVKIN**
Analysis of the Mechanism for Selecting Organizational
and Technological Solutions for Integrated Management
of Construction Processes..... 39
- A. A. SHUVAEV**
Tools for the Involvement of Construction and Demolition
Waste in the Repeated Production Cycle..... 48
- SUBJECT INDEX TO THE JOURNAL «NAUKA TA
PROGRES TRANSPORTU = SCIENCE AND
TRANSPORT PROGRESS» FOR 2023..... 59**

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.

№ 4 (104) 2023

(українською 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. 7,44. Тираж 100 пр. Зам. №02/04

Український державний університет науки і технологій

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 4 (104) 2023

(in Ukrainian 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 7,44. Circulation 100. Order no. 02/04

Ukrainian State University of Science and Technologies

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r.267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

