

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (БДУТ, Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор
(НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-
Universität Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ,
м. Чернігів)

Транспортні технології (275)

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ХНТУСГ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.
(VGTU, Литва)
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська
політехніка»)
Церклевич А. Л., д.т.н. професор (НУ «Львівська
політехніка»)
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

Теплоенергетика (144)

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Володарець М. В., к.т.н., старш. викл. (УкрДУЗТ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Будівництво та цивільна інженерія (192)

<i>Єфіменко А. С.</i> Дослідження об'ємних змін гіпсу з мінеральними добавками	6
<i>Римар Т. Е.</i> Використання НВЧ випромінювання для спучування рідкоскляних теплоізоляційних матеріалів	15
<i>Каплін Р. Б.</i> Сучасні сталезалізобетонні прогонові будови мостів малих і середніх прогонів	24

Механічна інженерія (131, 132, 133)

<i>Фідровська Н. М., Слепужніков Є. Д., Пономаренко Р. В., Козодой Д. С.</i> Обґрунтування конструкції кранового ходового колеса з еластичною вставкою	33
--	----

Транспортні технології (275)

<i>Прохорченко А. В., Гурін Д. О., Лагута І. О.</i> Удосконалення процедури пошуку раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій	41
<i>Ломотько Д. В., Ковальов Д. Д.</i> Застосування генетичних алгоритмів на стадії планування змішаних перевезень у міжнародному сполученні	50

Залізничний транспорт (273)

<i>Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Петухов В. М., Шовкун В. О.</i> Аналіз напруженого стану осі колісної пари пасажирського вагона	58
---	----

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 693.666.9

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄМНИХ ЗМІН ГІПСУ З МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ

Асп. А. С. Єфіменко

STUDY OF VOLUME CHANGES OF PLASTER WITH MINERAL ADDITIVES

Postgraduate student A. Yefimenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229525>

***Анотація.** Досліджено вплив мінеральних добавок на вологісні деформації штучного гіпсового каменю. Встановлено, що величина вологісної деформації залежить від вмісту мінеральної добавки. Максимальна деформація спостерігається у гіпсового каменю без добавки. Зі збільшенням її вмісту деформація знижується. Це зниження має не лінійний характер, а хвилеподібний аналогічно до відомих залежностей міцності й водостійкості від вмісту шлаку. Це підтверджує припущення про внесок у низьку водостійкість гіпсу розклинювального впливу води у його структурі. Величини вологісних деформацій штучного гіпсового каменю запропоновано застосовувати як додаткові показники його водостійкості.*

***Ключові слова:** гіпс, водостійкість, вологісна деформація, мінеральна добавка, шлак доменний гранульований мелений.*

***Abstract.** Pre-treatment viznachae infusion of mineral additives on the natural deformation of gypsum virob. The main reason for the low water resistance of the gypsum viruses is stated. The reason is ϵ a wedge vise. Such a grip breaks out local contacts with crystals. Tsi cause one to dress up in a negative synergistic effect. A wide circle of naukovts is looked around. Fakhivtsi detect the inflow of mineral and chemical additives on the water resistance of the gypsum. Zokrem is honored that the power of materials on the basis of inorganic viscous accumulation of the manifestation of electrostatic interconnection of subordinate electric spheres of structural elements.*

Before it was confirmed, the value of the biological deformation of the gypsum should be deposited instead of a mineral supplement. Uwagu zoseredzheno on slag blast-furnace granulated chalk.

The meta of the statistic was the determination of the degree of determination of the indicator of the uniform lineal deformation of the water saturation (swelling) ϵ_w at m / m . Such an indicator can be used with a supplementary indicator of water resistance. In the experimental preliminaries, we used G-10 grade G-10 industrial gypsum, Zaporizhstal blast-furnace granulation slag, and a plasticizing additive - sodium lignosulfonate in a 2% mixture of gipsu

For further development, the skin with three eyes was placed vertically near the vessel. A steel overlay was placed on top of the zrazok. Before the overlay, an indicator of the year-old type was set, fastened to a laboratory stand. The distance was fixed to the cob to show the indicator. The deformation took 3–5 years to develop. In the meantime, having reached the maximum value and mayzhe, the odra was repaired to decrease. At the same time, there will be a projection of the addition of a supplementary indicator of water resistance to the water consum

Due to the increase in the amount of slag, the deformation will decrease. The price decrease did not demonstrate a linear character. The character is sickly. This deposit is analogous to that of

*the deposits of the mines and water from the slag. Minimal deformation is more favorable for a piece gypsum stone with a removable slag $W / (H + W) 0.05-0.1$ and *ponad* 0.27. Tse pidtverzhu podpuschennya about injections at low water resistance gipsu ozklinuvalnogo inlet water. The wedge-shaped inflow of water is drawn through the contacts between the crystals and particles in the structures of the hypsers. The values of the natural deformations of a piece gypsum stone are projected according to the parameters of the water resistance.*

Keywords: *gypsum, water resistance, free deformation, mineral additive, slag of blast-furnace granulation of chalking.*

Вступ. Матеріали на основі гіпсових в'язучих характеризуються екологічністю, достатньою міцністю та довговічністю, невеликою вагою, відносно низькими тепло- і звукопровідністю. Завдяки цим перевагам гіпсові матеріали широко використовуються в будівництві, проте недостатня водостійкість, яка полягає у суттєвій втраті міцності у разі водонасичення або зволоження, стримує їх більш широке застосування. Низьку водостійкість гіпсових матеріалів в основному пояснюють розчинністю двогідрату кальцію, а також розклинювальними силами, створюваними водою, що всочується в пори.

На сьогодні відомо багато способів підвищення водостійкості гіпсу: зниження водогіпсового відношення, використання полімерних добавок, просочення та гідрофобізація поверхонь гіпсового каменю, сполучення з гідравлічними в'язучими, введення активних мінеральних добавок, добавок-мікронаповнювачів, що сприяють формуванню щільної структури гіпсового каменю. Під час досліджень з удосконалення складів гіпсового в'язучого водостійкість оцінюють коефіцієнтом розм'якшення – відношенням міцності на стиск у водонасиченому стані до міцності на стиск у вихідному сухому стані.

Проте внесок у водостійкість зазначених розклинювальних сил, створюваних водою, що всочується в пори, залишається недостатньо вивченим. Одночасно відомо, що ці сили одночасно призводять до вологісних деформацій штучного каменю. Отже, дослідження об'ємних деформацій штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками та їх

зв'язку з водостійкістю є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій науковців констатує визнання низької водостійкості гіпсових виробів. Низьку водостійкість гіпсових виробів пояснюють досить високою розчинністю гіпсу-двогідрату 2,04 г/л [1]. Крім того, вода, проникаючи в міжкристалічні порожнини гіпсового каменю, адсорбується на твердих поверхнях, між якими виникає розклинювальний тиск, що розриває локальні контакти між кристалами. Можна припустити, що ці причини сполучаються, підсилюючи одна одну.

Модифікації гіпсу присвячено багато досліджень [2–6]. Водостійкість гіпсових в'язучих можна підвищити зниженням водогіпсового відношення, поєднанням з гідравлічними в'язучими [4–6], введенням мінеральних добавок-наповнювачів [7–12], гідрофобізувальних добавок [12], полімерів, фібри [13]. Автори дають різні пояснення причин покращення властивостей. Комплексна мінеральна добавка, що включає доменний гранульований шлак, золу-винос і пуцолану (цеоліт), згідно з [15] забезпечує ущільнення структури цементного каменю, підвищення міцності. У [16] за рахунок уведення в шлаколувне в'язуче портландцементного клінкеру досягається управління власними деформаціями штучного каменю. Автори [17] для покращення фізико-механічних характеристик модифікують в'язучі речовини глинистими наповнювачами. Електроліти, особливо у вигляді комплексної добавки, забезпечують підвищення водонепроникності [18],

міцності [19] цементних композитів. У [19] такий вплив сульфатів і карбонатів калію і натрію пояснюється модифікацією мікроструктури і порової структури.

Регулювання структури і властивостей гіпсових матеріалів також можливе за рахунок уведення мінеральних наповнювачів та інших в'язучих різного складу і ступеня дисперсності [4–13, 20–23]. Найбільш стабільні композиції гіпсових в'язучих – гіпсоцементопуцоланові в'язучі [1]. Серед їх продуктів гідратації є не тільки кристали двогідрату сульфату кальцію, а й низькоосновні гідросилікати кальцію та інші малорозчинні гідрати. За [14], вони здатні утворювати електрогетерогенні контакти з кристалами двогідрату сульфату кальцію, які й забезпечують формування водостійкої структури.

У [4] водостійкість гіпсу з відходів досягається шляхом його змішування із золою-виносом і портландцементом. Автори [21] вводять у гіпс мінерали і органічні модифікатори, пояснюючи їх дію посиленням на атомно-молекулярному рівні. У [20] як замітник природного гіпсу застосовані промислові відходи, що містять двогідрат сульфату кальцію. Автори [22] для формування найбільш щільної структури гіпсового каменю застосовують методи комп'ютерного моделювання складу сировинної суміші, а [2] – обґрунтовують оптимальну пропорцію, яка забезпечує максимальну міцність змішаного в'язучого зі шлаку, гіпсу та клінкеру. У [5, 7, 10, 13] зазначено мікроармувальну дію мінеральних добавок на гіпсовий камінь і його вплив на міцність. Уведення в гіпс 14 % ультрадисперсного цеоліту сприяло підвищенню його водостійкості з 0,31 до 0,84 [7]. Аналогічний ефект від уведення цеоліту і карбоксилату в [10] пояснений також істотною зміною структури. В [13] підвищення міцності гіпсу пояснено ефектом дисперсного армування.

Вплив мінеральних і хімічних добавок на водостійкість гіпсу досліджено в [4, 7, 8, 11, 12]. Автори [8] модифікують гіпс

металургійним пилом і багатостінними вуглецевими нанотрубками. Спостережуване підвищення водостійкості вони пояснюють утворенням на поверхні кристалів гіпсу аморфних гідросілікатних структур, що зв'язують кристали гіпсу і перешкоджають доступу до них води. В [9] гіпс модифікують ультрадисперсним металургійним пилом і ангідритом. Автори зазначають зміну морфології, яка призводить до ущільнення та підвищення міцності й водостійкості. В [11] у результаті введення комплексної хімічної добавки зазначаються прискорення гідратації і утворення більш щільної структури. Мікрота нанодобавками карбіду кремнію SiC , які діють як центри кристалізації і приводять до утворення більших кристалів, також прискорюють гідратацію і структуроутворення [12].

Як відомо [23], властивості матеріалів на основі неорганічних в'язучих обумовлені наявністю електростатичної взаємодії подвійних електричних шарів структурних елементів. Міцність та водостійкість гідравлічних в'язучих визначається міцними електрогетерогенними контактами між частинками з протилежними поверхневими зарядами. Повітряні в'язучі складаються з елементів, що мають однойменні поверхневі заряди, тому їх міцність та водостійкість визначається електрогомогенними контактами з міжмолекулярною взаємодією. У [3] висунуто і підтверджено гіпотезу про досягнення максимально можливих фізико-механічних показників тверднучих мінеральних в'язучих за рахунок рівності між собою сумарних площ поверхні частинок дисперсної фази в одиниці об'єму, що мають протилежні поверхневі заряди. Вважаємо, що досягнення такої рівності можливе за рахунок регулювання складу продуктів гідратації в'язучого, впровадження в їх структуру високодисперсних інертних частинок. Міцність гіпсового каменю визначають переважно електрогомогенні контакти між кристалогідратами

гіпсу зі слабкою міжмолекулярною взаємодією. Ці контакти руйнуються навіть при незначних напругах [3, 14]. Для забезпечення водостійкості та збільшення міцності гіпсових в'язучих у [2, 14] запропоновано до їх складу вводити мінеральні добавки – наповнювачі та мікронаповнювачі з визначеними поверхневими зарядами, що приведе до утворення значної кількості електрогетерогенних контактів з гранями кристалогідратів гіпсу.

У [26, 3] показано, що водостійкість гіпсу з мінеральними добавками, зокрема шлаком доменним гранульованим меленим, залежить від товщини прошарків гіпсу-двогідрату між частинками мінеральних наповнювачів. Товщина цих прошарків пов'язана зі структурною характеристикою наповненого гіпсового каменю – коефіцієнтом розсунення частинок мінерального наповнювача гіпсом-двогідратом η . Залежність міцності штучного каменю та, особливо, його водостійкості, за [26], має хвилеподібний або екстремальний характер з максимумами, яким відповідають оптимальні величини коефіцієнтів розсунення $\eta_{\text{опт}}$. Максимальні міцність та водостійкість забезпечуються у разі утворення найбільш щільних упаковок кристалів гіпсу-двогідрату у прошарках між частинками мінерального наповнювача та відповідності фактичної величини коефіцієнта розсунення η його оптимальній величині $\eta_{\text{опт}}$. Для реалізації цього у [26, 3] запропоновано забезпечувати оптимальне значення коефіцієнта розсунення $\eta_{\text{опт}}$, аналогічного до оптимальних коефіцієнтів розсунення зерен крупного заповнювача $\alpha_{\text{опт}}$ та дрібного заповнювача $\mu_{\text{опт}}$ у бетонах. Для збільшення щільності гіпсового каменю можливо також застосування нанодисперсних наповнювачів, які, вбудовуючись у структуру, заповнюють міжкристалічні порожнини і сприяють ущільненню структури [3, 14]. У такому випадку кількість і дисперсність наповнювачів підбирається таким чином, щоб утворювалися щільні упаковки частинок матриці в прошарках між

структуруювальними частинками: кристалогідратів гіпсу – між частинками шлаку, нанодисперсних частинок – між кристалогідратами гіпсу [3, 14]. Крім того, нанодисперсні частинки наповнювача можуть служити центрами кристалізації, підвищуючи дисперсність кристалогідратів та ущільнюючи структуру.

Визначення мети та завдання дослідження. Завдання дослідження походять з уяви про низьку водостійкість гіпсу від розклинювального впливу води. Такий вплив проявляється у контактах між окремими кристалами і частинками в структурі гіпсу. Метою статті стало обґрунтування доцільності застосування відносної лінійної вологісної деформації від водонасичення (набухання) ϵ_w , м/м, як додаткового показника водостійкості.

Основна частина дослідження. В експериментальних дослідженнях застосували гіпс будівельний марки Г-10, шлак доменний гранульований «Запоріжсталь» мелений, пластифікуючу добавку – лігносульфонат натрію у кількості 2 % від маси гіпсу.

Шлак доменний гранульований «Запоріжсталь» мелений: хімічний склад, %: SiO₂ – 36,5; Fe₂O₃ – 5,1; Al₂O₃ – 6,7; CaO – 46,5; MgO – 5,9; SO₃ – 4,2; модуль основності – 1,19; істинна густина – 2810 кг/м³; питома поверхня – 3000 см²/г; гранулометричний склад, визначений вимірюваннями за допомогою лінійки мікроскопу МБИ-6, %: до 10 мкм – 2,5; 10–23 мкм – 11; 23–36 мкм – 8,6; 36–49 мкм – 12,9; 49–62 мкм – 8,8; 62–75 мкм – 6,8; 75–88 мкм – 9,2; 88–101 мкм – 6,7; 101–114 мкм – 10,6; 114–127 мкм – 10,3; понад 127 мкм – 12,7, отже, близько 80 % – у межах 10–130 мкм, середній розмір – 60 мкм.

Вологісну деформацію визначали на зразках-призмах розміром 160×40×40 мм, які тверділи не менше 7 діб, висушених за температури 18–22 °С та відносної вологості 40–60 % до постійної маси.

Для кожного складу випробували не менше трьох зразків. Попередньо

вимірювали довжину зразків L . Кожен зразок встановлювали вертикально у посудину, зверху накладали сталеву або скляну накладку, підводили до неї індикатор годинникового типу, закріплений у лабораторному штативі (рис. 1), та фіксували початкове показання індикатора.

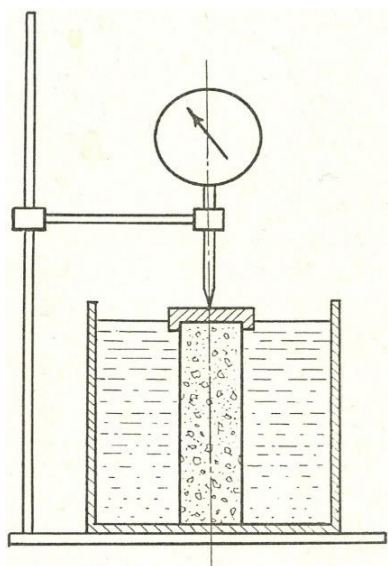


Рис. 1. Вимірювання вологісних деформацій штучного гіпсового каменю з мінеральними добавками

У посудину наливали воду до рівня верхньої грані зразка і не рідше ніж кожні 0,25–0,5 годин протягом перших 6 годин знімали показання індикатора. Спостереження здійснювали протягом не менше 1 доби.

Для кожного моменту часу i за показанням індикатора X_i знаходили величину абсолютної лінійної вологісної деформації, мм:

$$\Delta L_i = X_i - X_0, \quad (1)$$

де X_0 – початкове показання індикатора перед наливанням води.

Для кожного моменту часу визначали відносну вологісну деформацію:

$$\varepsilon_w = \Delta L_i / L. \quad (2)$$

За величинами ε_w будували кінетичну криву залежності ε_w від часу, за якою визначали максимальну величину ε_w і час, за який її досягнуто.

Результати дослідження подано на рис. 2, 3 і в табл. 1.

Таблиця 1

Максимальні вологісні деформації ε штучного гіпсового каменю з різним відносним вмістом мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого Ш/(Г+Ш)

№	Ш/(Г+Ш)	В/(Г+Ш)	Відносна вологісна деформація зразків ε_w , м/м						$\varepsilon_{w\text{сеп}}$, м/м
			0,64020	0,78047	1,60285	1,05040	0,91300	1,12973	
К	0	0,35	0,64020	0,78047	1,60285	1,05040	0,91300	1,12973	1,01937
1	0,09	0,32	0,59156	0,43218	0,27623				0,43332
2	0,17	0,29	0,54071	0,39653	0,54162	0,96342	0,91690	0,78600	0,69081
3	0,23	0,27	1,12251	0,72981	0,67662				0,84298
4	0,29	0,25	0,75382	0,38879	0,29888				0,48050
5	0,33	0,23	0,35869	0,32983	0,76449				0,34426

Із рис. 2, 3 і табл. 1 видно, що після занурення зразків у воду одразу починається збільшення їх довжини внаслідок вологісної деформації – набухання. Деформація

розвивається протягом 3–5 годин, після чого досягає максимальної величини і майже одразу починає знижуватись.

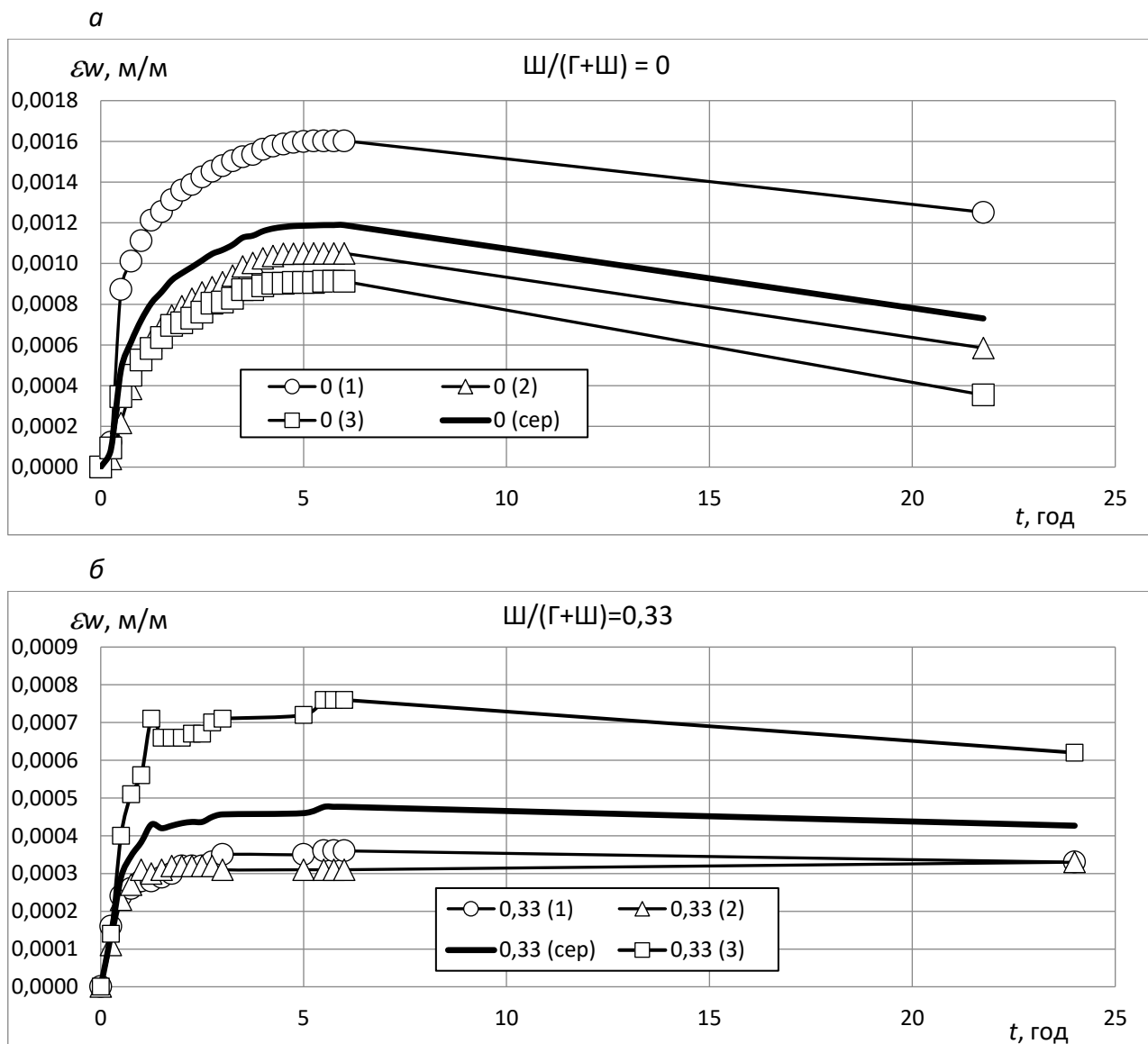


Рис. 2. Залежність від часу t вологісної деформації ε_w штучного гіпсового каменю з відносним вмістом мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого Ш/(Г+Ш): а – 0 (гіпсового каменю без добавок); б – 0,33

Із рис. 3, 4 і табл. 1 випливає, що величина вологісної деформації залежить від вмісту мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого. Максимальна деформація спостерігається у гіпсового каменю без мінеральної добавки. Зі збільшенням вмісту шлаку відносна деформація знижується. Проте це зниження має не лінійний характер, а хвилеподібний аналогічно до залежностей міцності й водостійкості від вмісту шлаку.

Із рис. 3, 4 і табл. 1 видно, що мінімальні вологісні деформації спостерігаються у штучного гіпсового каменю з відносним вмістом шлаку Ш/(Г+Ш) 0,05–0,1 і понад 0,27. Це узгоджується з характером залежностей водостійкості штучного гіпсового каменю від відносного вмісту шлаку та підтверджує припущення про внесок у низьку водостійкість гіпсу розклинювального впливу води у контактах між окремими кристалами і частинками в

його структурі. Отже, величини вологісних деформацій штучного гіпсового каменю

доцільно застосовувати як додаткові показники його водостійкості.

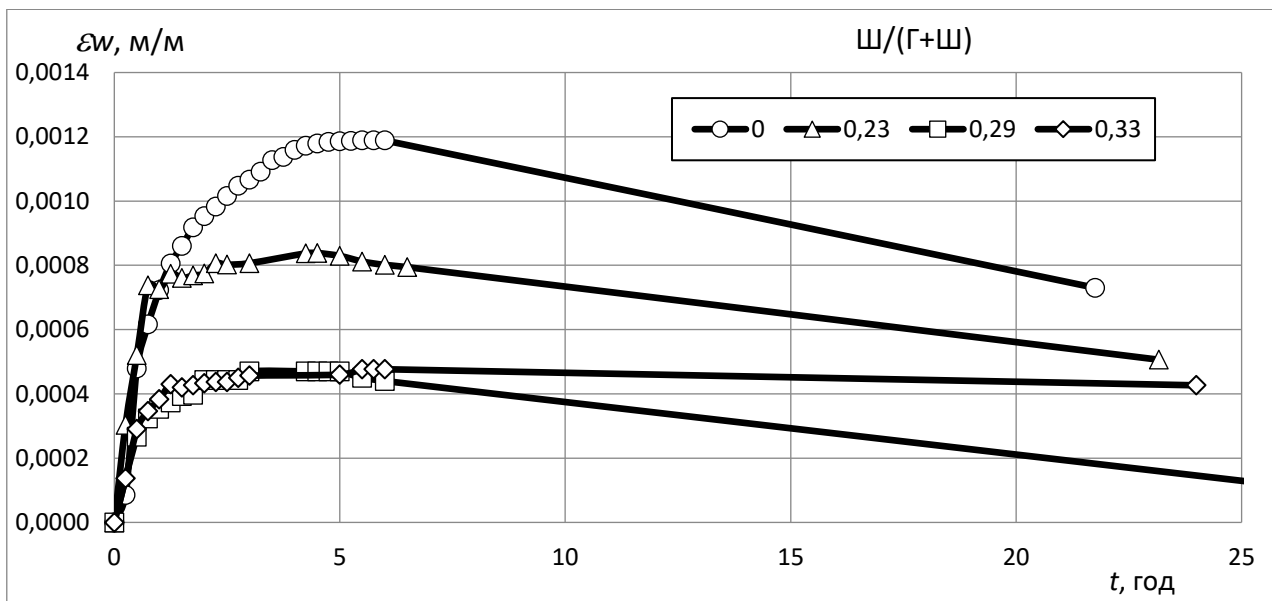


Рис. 3. Залежність від часу t вологісної деформації ε_w штучного гіпсового каменю з різним відносним вмістом мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого Ш/(Г+Ш)

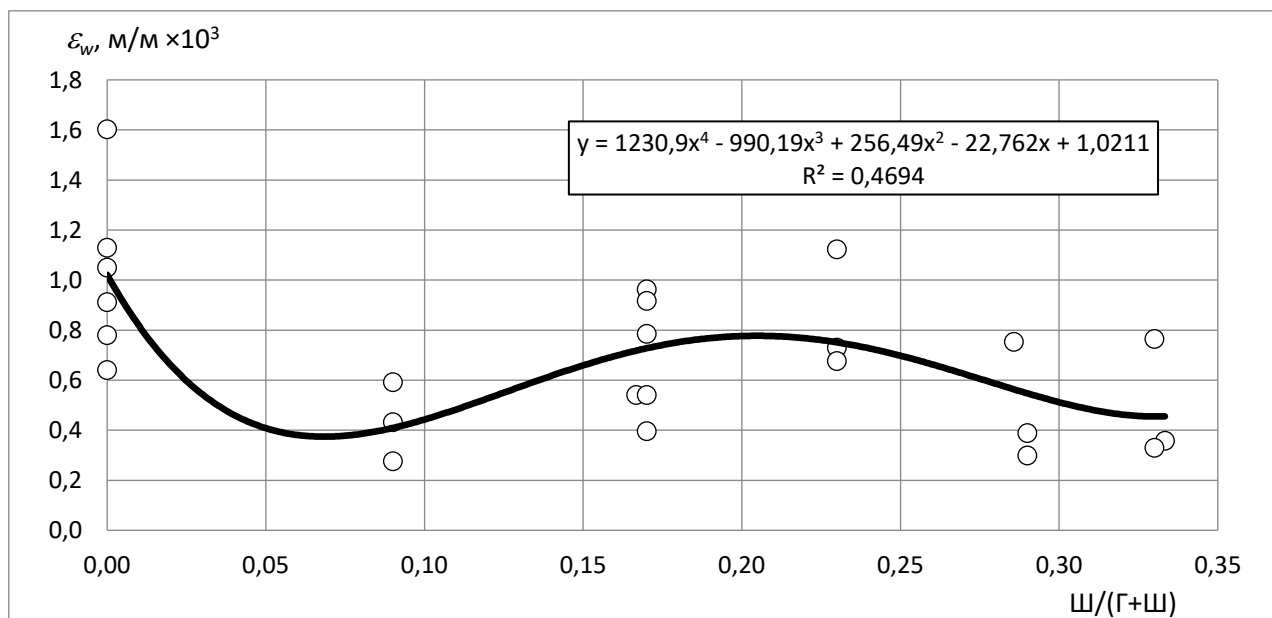


Рис. 4. Залежність максимальної вологісної деформації ε штучного гіпсового каменю від відносного вмісту мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого Ш/(Г+Ш)

Висновки. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що після занурення зразків штучного гіпсового каменю у воду одразу починається збільшення їх довжини внаслідок вологісної деформації – набухання. Деформація розвивається протягом 3–5 годин, після чого досягає максимальної величини і майже одразу починає знижуватись.

Встановлено, що величина вологісної деформації залежить від вмісту мінеральної добавки шлаку доменного гранульованого меленого. Максимальна деформація спостерігається у гіпсового каменю без мінеральної добавки. Зі збільшенням вмісту шлаку відносна деформація знижується.

Проте це зниження має не лінійний характер, а хвилеподібний аналогічно до відомих залежностей міцності й водостійкості від вмісту шлаку. Мінімальні вологісні деформації спостерігаються у штучного гіпсового каменю з відносним вмістом шлаку Ш/(Г+Ш) 0,05–0,1 і понад 0,27.

Це підтверджує припущення про внесок у низьку водостійкість гіпсу розклинювального впливу води у контактах між окремими кристалами і частинками в його структурі. Отже, величини вологісних деформацій штучного гіпсового каменю доцільно застосовувати як додаткові показники його водостійкості.

Список використаних джерел

1. Гипсовые материалы и изделия / под ред. А. В. Ферронской. Москва: АСВ, 2004. 488 с.
2. Sanytsky M., Fischer H., Korolko S. Modified composite gypsum binders based on phosphogypsum // 16 Internationale Baustofftagung. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2006. Band 1. P. 875–882.
3. Increase of gypsum water resistance by mineral additives / A. A. Plugin, O. A. Plugin, H.-B. Fisher, G. N. Shabanova. 1 Weimarer Gipstagung, 2011. P. 435–443.
4. Wansom S., Chintamongkro P., Srijampan W. Water resistant blended cements containing flue-gas desulfurization gypsum, Portland cement and fly ash for structural applications. *Cement and Concrete Composites*, 2019. 103. P. 134–148. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.033> (last access: 30.08.2020).
5. Zavadskaya L. V., Berdov G. I. Change of Structure and Strength of Gypsum at Adding Disperse Mineral Additives. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2016. 1. P. 86–93. URL: <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.12.2306> (last access: 30.08.2020).
6. Sun H., Qian J., Yang Y., Fan C., Yue Y. Optimization of gypsum and slag contents in blended cement containing slag. *Cement and Concrete Composites*. 2020. 112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103674> (last access: 30.12.2020).
7. Egorova A. D., Filippova K. E. Ultra-disperse modifying zeolite-based additive for gypsum concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 687. 022030. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/2/022030> (last access: 30.08.2020).
8. Water-resistant Gypsum Compositions with Man-made Modifiers / G. N. Pervyshin, G. I. Yakovlev, A. F. Gordina, J. Keriene, I. S. Polyanskikh, H. B. Fischer, A. F. Buryanov. *Procedia Engineering*. 2017. 172. 867–874. Elsevier Ltd. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.087> (last access: 30.08.2020).
9. Anhydrite and gypsum compositions modified with ultrafine man-made admixtures / G. Yakovlev, I. Polyanskikh, G. Fedorova, A. Gordina, A. Buryanov. *Procedia Engineering*. 2015. 108. P. 13–21. Elsevier Ltd. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.195> (last access: 30.08.2020).
10. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance / M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, H. B. Fischer, N. Kondratieva. *Chemistry and Chemical*

Technology. 2019. 13(4). P. 495–502. URL: <https://doi.org/10.23939/chcht13.04.495> (last access: 03.08.2021).

11. Study of modified gypsum binder / N. Kondratieva, M. Barre, F. Goutenoire, M. Sanytsky. *Construction and Building Materials*. 2017. 149. P. 535–542. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.140> (last access: 26.08.2020).

12. Effect of additives SiC on the hydration and the crystallization processes of gypsum / N. Kondratieva, M. Barre, F. Goutenoire, M. Sanytsky, A. Rousseau. *Construction and Building Materials*. 2020. 235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117479> (last access: 21.08.2020).

13. On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres / F. Suárez, L. Felipe-Sesé, F. A. Díaz, J. C. Gálvez, M. G. Alberti. *Construction and Building Materials*. 2020. 244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118347> (last access: 30.08.2020).

14. Structure and strength of gypsum: Mechanism of strength and water resistance / A.N.Plugin, A. A. Plugin, Yu. G. Gasan, H.-B. Fisher, O. A. Plugin. 2 Weimarer Gipstagung, 2014. P.427–438.

15. Study of low-emission multicomponent cements with a high content of supplementary cementitious materials / H. Ivashchyn, M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, B. Rusyn. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4(6–100). P. 39–47. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175472> (last access: 30.08.2020).

16. The Influence of Complex Additive on Strength and Proper Deformations of Alkali-Activated Slag Cements / P. V. Krivenko, O. Petropavlovskiy, I. Rudenko, O. P. Konstantynovskiy. *Materials Science Forum*. 2019. 968. P. 13–19. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.13> (last access: 30.08.2020).

17. Acid-basic surface properties of clay disperse fillers / Y. Danchenko, V. Andronov, V. Sopov, I. Khmyrov, A. Khryapynskyy. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 230. 03004. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003004> (last access: 22.08.2020).

18. Plugin A. A., Pluhin O. A., Borziak O. S., Kaliuzhna O. V. The Mechanism of a Penetrative Action for Portland Cement-Based Waterproofing Compositions. In: Blikharsky Z., Koszelnik P., Mesaros P. (eds) *Proceedings of CEE 2019. CEE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_5 (last access: 28.08.2020).

19. The role of chemical admixtures in the formation of the structure of cement stone / V.Sopov, L. Pershina, L. Butskaya, E. Latorets, O. Makarenko. *MATEC Web of Conferences*. 2017. 116. 01018. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711601018> (last access: 25.08.2020).

20. Lushnikova N., Dvorkin L. 25 Sustainability of gypsum products as a construction material. In *Sustainability of Construction Materials* (2nd edn.). 2016. P. 643–681. Woodhead Publ. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00025-1> (last access: 30.08.2020).

21. Gypsum composites reinforcement / V. Petropavlovskaya, A. Buryanov, T. Novichenkova, K. Petropavlovskii. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 365, 3. Institute of Physics Publishing. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032060> (last access: 30.08.2020).

22. Buryanov A., Petropavlovskaya V., Novichenkova T. Structuring in systems on the basis of calcium sulfate dihydrate. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 467. P. 91–96. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.467.91> (last access: 25.08.2020).

23. Плугин А. Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: монография в 3 т. / под ред. А. Н. Плугина. Киев: Наук. думка, 2012. Т.2. 224 с.

24. Влияние активных поверхностных центров на прочность свежееотформованных мелкозернистых бетонов / В. И. Бабушкин, А. А. Плугин, Т. А. Костюк, В. А. Матвиенко. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 1999. Вип. 5. С. 85–88.

25. Підвищення міцності та водостійкості гіпсових в'язучих нанодисперсними мінеральними добавками / А. А. Плугін, Х.-Б. Фішер, О. С. Борзяк, А. С. Єфіменко, А. А. Жигло. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 171. С. 37–43.

26. Плугин А. А. Совершенствование состава и структуры бетона с учетом электроповерхностных свойств его составляющих для повышения прочности и стойкости изделий кольцевого сечения: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05. Защ. 14.06.1994. Харьков: ХИСИ, 1994. 245 с.

Єфіменко Артем Сергійович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +380509443176. E-mail: A.efimenko03@gmail.com.

Iefimenko Artem, postgraduate student, Department of Building Materials, Structure and Construction, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel:+380509443176. E-mail: A.efimenko03@gmail.com.

Статтю прийнято 30.09.2020 р.

УДК 691-405.8

ВИКОРИСТАННЯ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ СПУЧУВАННЯ РІДКОСКЛЯНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Канд. техн. наук Т. Е. Римар

USE OF MICROWAVE RADIATION FOR SEPARATION OF LIQUID GLASS HEAT INSULATION MATERIALS

PhD (Tech.) T. Rymar

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229526>

Анотація. Дослідження ринку теплоізоляції України показало, що переважають на цьому ринку ніздрюваті бетони і силікати, які застосовують як теплоізоляційні матеріали при середній щільності 300–500 кг/м³. До їх недоліків відносять великі значення водопоглинання і гігроскопічності, а також дуже низьку міцність на вигин, оскільки такий матеріал не володіє еластичністю і застосування невеликих згинальних зусиль призводить до його розтріскування. Комплексом експлуатаційних властивостей, що відповідають найвищим нормативним вимогам, володіє піноскло. Піноскло – найміцніший з усіх ефективних теплоізоляційних матеріалів, однак цей матеріал є крихким. Він чутливий до вібраційно-індукованих пошкоджень. До того ж технологія виробництва піноскла досить складна і потребує високих енерговитрат, як наслідок, вартість цього матеріалу висока. Тому актуальним було розробити теплоізоляційний матеріал з відповідним рівнем експлуатаційних властивостей при зниженні витрат на виробництво. Досягти цього вдалося застосуванням енергоощадної технології НВЧ спучування рідкоскляних матеріалів. Ця технологія базується на одночасному спучуванні рідкоскляного грануляту та зв'язуючого в умовах НВЧ випромінювання, яке завдяки об'ємному прогріву рідкоскляної композиції дає змогу отримати

міцний омонолічений матеріал з жорсткою, однорідною та переважно закритопористою структурою.

Ключові слова: теплоізоляційні матеріали, рідке скло, НВЧ випромінювання, омонолічування, рідкоскляні гранули, зв'язуюче.

Abstract. The study of the thermal insulation market of Ukraine showed that the market is dominated by aerated concrete and silicates, which are used as thermal insulation materials at an average density of 300-500 kg / m³. Their disadvantages include high values of water absorption and hygroscopicity, as well as very low flexural strength, because this material does not have elasticity and the use of small bending forces leads to its cracking. Foam glass has a set of operational properties that meet the highest regulatory requirements. Foam glass is the strongest of all effective thermal insulation materials, but this material is fragile. It is sensitive to vibration - induced damage. In addition, the technology of production of foam glass is quite complex and requires high energy consumption, as a consequence, the cost of this material is high. Therefore, it was important to develop thermal insulation material with the appropriate level of performance while reducing production costs. This was achieved by using energy-saving microwave technology to swell liquid glass materials. This technology is based on the simultaneous swelling of the liquid glass granulate and the binder under microwave radiation, which, due to the volumetric heating of the liquid glass composition, allows to obtain a strong monolithic material with a rigid, homogeneous and mostly closed-porous structure. The production of thermal insulation materials is proposed to be carried out on the basis of liquid glass granulate, because the introduction of granules reduces the deformability and shrinkage of the material and prevents its cracking, increases its strength, because the granular material has a certain plastic deformation, reduces water hygroscopicity. granules swell to form a compacted shell, which slows down the absorption kinetics of water and its vapor. The monolithic granules are proposed to be carried out with a binder that foams not only due to the release of water, but also with the help of a gasifier, because this technology will allow uniform distribution of the binder in the intergranular space, thus forming a more homogeneous structure of the material, which has a positive effect on its physical and mechanical characteristics.

Keywords: heat-insulating materials, liquid glass, microwave radiation, monolithic treatment, liquid glass granules, binder.

Вступ. Дослідження ринку теплоізоляції України показало, що виробників теплоізоляційних матеріалів (ТІМ) на основі рідкого скла (РС) в плитній формі немає. Якщо посилається на літературні дані, то промисловістю випускався випалювальний склосилікат, який отримували на основі гранул склопора омонолічених рідким склом, але міцність таких матеріалів була заниженою, так при щільності 130–200 кг/м³ міцність при стиску складала 0,2–0,4 МПа [1]. На сьогодні виробництва таких матеріалів не налагоджено в Україні і таких матеріалів не представлено на українському ринку теплоізоляції. Переважають на ринку теплоізоляції ніздрюваті бетони і силікати,

які застосовують як теплоізоляційні матеріали при середній щільності 300–500 кг/м³. Залежно від виду застосованого пороутворювача і в'язучої речовини в цих матеріалах їх називають газобетонами, газосилікатами, пінобетонами, піносилікатами. Ці бетони можуть бути змішані з пороутворювачем і тоді мають назви – піногазобетони, піногазосилікати тощо. Залежно від технології ніздрюваті бетони розділяють на автоклавні і неавтоклавні. Ніздрюваті бетони автоклавного тверднення (в середовищі насиченої пари, при температурі ~200 °С і тиску 10–14 атм.) – це штучно синтезований камінь, а неавтоклавні бетони – застиглий у поризованому стані цементно-піщаний розчин [2–3]. До їх

недоліків відносять великі значення водопоглинання і гігроскопічності, а також дуже низьку міцність на вигин, оскільки такий матеріал не володіє еластичністю і застосування невеликих згинальних зусиль призводить до його розтріскування.

Ще одним широко використовуваним теплоізоляційним матеріалом є вермікулітові плити. Їх складовими є спучений вермікуліт і рідке скло як неорганічний зв'язуючий елемент. Це негорючий і хімічно нейтральний матеріал, який використовується як елемент вогнестійких і теплоізоляційних конструкцій у цивільному та промисловому будівництві [3]. Однак їх застосування можливе лише за умови гідроізоляції через високу гігроскопічність, до того ж вони не є водостійкими: будучи поміщеними у воду, практично миттєво руйнуються. Крім того, спучені вермікулітові гранули одержують шляхом термічної обробки вихідного мінералу при температурах близько 900–1200 °С, а сушіння плит забирає 5–7 годин при температурі 120–200 °С, що тягне за собою великі енерговитрати.

Комплексом експлуатаційних властивостей, що відповідають найвищим нормативним вимогам, володіє піноскло. В Європейському Союзі воно є визнаним і одним з найефективніших теплозахисних будівельних матеріалів. Піноскло – найміцніший з усіх ефективних теплоізоляційних матеріалів, однак цей матеріал є крихким. Він чутливий до вібраційно-індукованих пошкоджень [4–5]. До того ж технологія виробництва піноскла досить складна і потребує високих енерговитрат, як наслідок, вартість цього матеріалу висока. Тому актуальним було розробити теплоізоляційний матеріал з відповідним рівнем експлуатаційних властивостей при зниженні витрат на виробництво.

Прикладом таких матеріалів є ТІМ на основі рідкого скла, вони поєднують низьку теплопровідність (0,030–0,065 Вт/м·°С) з широким інтервалом температур експлуатації (від -60 до 600 °С), негорючістю та

біостійкістю при гарантованому терміні експлуатації – не менше 50 років. Однак на сьогодні теплоізоляційні матеріали на основі РС випускають переважно у вигляді гранул. Великомасштабного промислового виробництва композиційних ТІМ у вигляді плит та виробів іншої конфігурації не налагоджено, що пов'язано зі складністю прогріву внутрішніх об'ємів рідкоскляної композиції (РСК) при використанні традиційного конвективного нагріву. Як альтернативне джерело термообробки при виробництві таких ТІМ можливо використовувати НВЧ випромінювання, яке дасть змогу здійснити об'ємний прогрів рідкоскляної композиції та отримати якісний ТІМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом великої актуальності набуває використання нових і нетрадиційних видів енергії. НВЧ випромінювання, без сумніву, належить до таких видів енергії, але, на жаль, незважаючи на велику поширеність малих НВЧ-апаратів, галузь застосування НВЧ випромінювання для виробництва матеріалів вивчена досить слабо.

Можна стверджувати, що застосування НВЧ енергії при сушінні, вулканізації, низькотемпературному нагріванні діелектриків, дефростації – вже достатньо відпрацьовані технології. Установки для реалізації таких технологічних процесів успішно продаються на ринку, але їх частка досить мала. Інженери, що працюють у сфері нових електротехнологій, створюють нові розробки, які часто відрізняються від існуючих більш високими показниками якості кінцевої продукції, високою продуктивністю, екологічністю та іншими показниками, однак, ці нові технології так і не доходять до споживача [6]. Фізико-хімічні процеси, які проводять за допомогою мікрохвильового нагріву, мають істотно нижчі часові і енергетичні витрати, ніж при використанні традиційних методів здійснення цих процесів. Більш того, в ряді випадків за рахунок мікрохвильового

впливу можна домогтися результатів, яких не можна досягти за допомогою інших методів [7].

Останнім часом набуло досить широкого застосування електромагнітне випромінювання НВЧ діапазону в будівництві для цілеспрямованої зміни структури і поліпшення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей будівельних матеріалів.

Так, у роботі [8] проводилися дослідження ефективності використання НВЧ випромінювання при активації золи-виносу для бетонних сумішей. Після мікрохвильової дії частинки золи-виносу характеризуються меншими розмірами, отже, для них характерні більш високі значення надмірної вільної енергії і вони схильні до процесів когерентного зрощення і агрегації первинних кристалітів, що і забезпечує приріст міцності за рахунок активованої золи-виносу. Оскільки активована зола-винос набуває додаткової гідравлічної активності, вона може успішно бути використана у поєднанні з іншими техногенними продуктами для виробництва низькомарочних в'язучих [8].

При використанні НВЧ випромінювання в галузі хімії будівельних матеріалів особливо важливу роль разом з об'ємним внутрішнім розігріванням матеріалу відіграє так званий «нетермічний» ефект НВЧ випромінювання. Одночасний прояв цих ефектів знаходить застосування при виробництві гідравлічних і повітряних в'язучих з використанням побічних продуктів промисловості [9], а також для поліпшення міцнісних властивостей обпалених виробів глинистих композицій [10–11].

Відомі роботи [12] присвячені дослідженню впливу НВЧ-обробки на фізико-механічні властивості бітумів, в яких зазначається позитивний вплив хвиль надвисокочастотного діапазону на показники міцності, водо-, теплостійкості, температурної чутливості і погодно стійкості асфальтобетону.

Величезним поштовхом у будівництві є застосування НВЧ технологій при отриманні ніздрюватих бетонів. Так, у роботі [13] вивчено процес сушіння ніздрюватого бетону із залученням НВЧ випромінювання при видаленні води з внутрішніх об'ємів ніздрюватого бетону. У роботі була показана неприпустимість застосування НВЧ технології на ранньому терміні твердіння ніздрюватого бетону через велику кількість води в його об'ємі. У ранні терміни твердіння відбуваються реакції гідратації і утворення гелю, який потім кристалізується. Якщо почати застосовувати НВЧ технологію на ранніх термінах, вода видалиться з об'єму матеріалу і процеси гідратації не зможуть відбуватися, що призведе до тріщиноутворення і втрати міцності ніздрюватого бетону. Велика кількість води в об'ємі неприпустима через напруги, що викликаються зміною агрегатного стану при переході води у пару.

У роботі [14] встановлено перспективність отримання малоусадкового пінобетону за допомогою НВЧ випромінювання, яке забезпечує рівномірне сушіння без усадкових проявів і помітних тріщин завдяки рівномірному розподілу теплових потоків у масиві пінобетону, яке досягається за рахунок одночасного прогрівання його об'єму. Досліджуючи особливості сушіння неавтоклавного пінобетону, встановлено, що для внутрішнього розігрівання пористих матеріалів НВЧ-нагрів не вимагає теплопередачі, а реалізується за рахунок перетворення електромагнітної енергії на теплову в усьому об'ємі матеріалу, що обігрівається, яким може виступати пінобетон. При цьому градієнт температури в зразку істотно знижується, завдяки чому знижується внутрішня напруга в пінобетоні.

У технології силікатних теплоізоляційних матеріалів мікрохвильове випромінювання застосовується переважно для модифікації властивостей готових виробів [15–17].

Так, використання НВЧ випромінювання для спучування рідкого скла має ряд переваг:

1) високий ступінь поглинання компонентами сировини енергії електромагнітного поля НВЧ (за рахунок того, що рідке скло містить воду);

2) можливість зі швидкістю світла підвести і виділити в одиниці об'єму зразка потужність, не доступну жодному з традиційних способів підведення енергії;

3) практично 100 % ККД перетворення НВЧ енергії в теплову, що виділяється в матеріалі, який нагрівається, низькі втрати енергії в підвідних трактах і робочих камерах;

4) можливість миттєвого включення і виключення теплового впливу, що забезпечує режим теплової безінерційності і високу точність регулювання нагріву.

Визначення мети та завдання дослідження. Таким чином, *метою даної роботи* є розробка енергоощадної технології теплоізоляційних матеріалів на основі рідкого скла з використанням НВЧ випромінювання. Для досягнення поставленої мети було досліджено вплив НВЧ випромінювання на властивості даних матеріалів і проведено порівняльну їх оцінку з найбільш близькими за технічними характеристиками ТІМ, які випускаються промисловістю.

Основна частина дослідження. Застосування НВЧ-установок досить новий технологічний прийом у промисловості теплоізоляційних матеріалів. Шляхи застосування НВЧ технології у виробництві теплоізоляційних матеріалів об'єднані одним загальним пунктом – можливістю об'ємного прогріву матеріалу і скорочення енерговитрат на виробництво, що послужило визначальним фактом при виборі технології отримання даних теплоізоляційних матеріалів.

Виготовлення теплоізоляційних матеріалів пропонується проводити на основі рідкоскляного грануляту та зв'язуючого також на основі рідкого скла.

Ефективність уведення гранул полягає у зменшенні деформативності і усадкових явищ ТІМ та запобіганні його розтріскуванню; підвищенні їх показників міцності, оскільки гранульований матеріал володіє певною пластичною деформацією; зменшенні гігроскопічності та водопоглинання матеріалу, оскільки на поверхні гранул при спученні утворюється ущільнена оболонка, яка уповільнює кінетику поглинання води та її пари. Отримання гранул пропонується проводити рідинною грануляцією рідкоскляної композиції шляхом коагуляції рідкого скла в середовищі розчину хлориду кальцію [18]. Омонолічування гранул пропонується здійснювати зв'язуючим, що спінюється не лише за рахунок вивільнення води, але і за допомогою газоутворювача, тому що така технологія дозволить здійснити рівномірний розподіл зв'язуючого у міжгранульному просторі. При чому омонолічувати пропонується сирі (не спучені) гранули та проводити одночасне спучення і гранул, і зв'язуючого під дією НВЧ випромінювання, тому що при одночасному збільшенні об'єму і гранул, і зв'язуючого утворюється більш однорідна структура матеріалу, що позитивно відбивається на його фізико-механічних характеристиках [19–20]. Крім того, запропонована технологія більш економічна, тому що виключає стадію окремого спучення гранул, тим самим скорочуючи енерговитрати на виробництво. Досягти одночасного спучення гранул і зв'язуючого можна лише при використанні НВЧ випромінювання, яке, на відміну від традиційного конвективного нагріву, дозволяє здійснити об'ємний прогрів рідкоскляної композиції та отримати міцний омонолічений матеріал, який задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.6-189:2013.

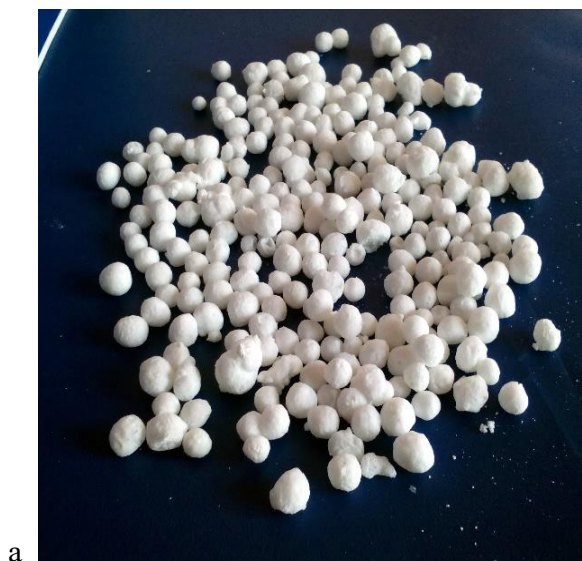
Методика проведення дослідження.

Технологія композиційних ТІМ на основі РС має такі стадії: 1) приготування РСК згідно з обраною рецептурою для гранул; 2) гранулювання РСК у розчині хлориду

кальцію; 3) витримка гранул у розчині протягом 30–40 хв при температурі 25–30°C; 4) сушіння отриманих гранул до залишкової вологості ~50 %; 5) приготування РС зв'язуючого обраної рецептури для композиційного матеріалу, 6) перемішування РС зв'язуючого і неспучених гранул у співвідношенні 1:1; 7) формування виробу

та його спучування в НВЧ-установці при потужності 650 Вт, що відповідає температурі 115–120 °С, протягом 8–10 хв; 8) вилучення виробу з форми.

Зовнішній вигляд гранульованих та композиційних теплоізоляційних матеріалів, отриманих із застосуванням НВЧ випромінювання, подано на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Зовнішній вигляд теплоізоляційних матеріалів:
а – гранульованих; б – композиційних

Основні фізико-механічні властивості ТІМ визначались згідно з чинними державними та міжнародними стандартами ISO: щільність (ДСТУ ISO 5016: 2013), вологість, сорбційна вологість (гігроскопічність), водопоглинання, межа міцності при 10 %-й деформації стискання, межа міцності на вигин, лінійна температурна усадка (ДСТУ Б В.2.7-38-95), теплопровідність (ДСТУ Б В.-2.7-105-2000).

Порівняльні властивості отриманого композиційного матеріалу на основі рідкоскляного грануляту з піносклом, піносилікатом та вермікулітовою плитою подано в таблиці.

Найбільш близьким за властивостями до розробленого теплоізоляційного

матеріалу є піноскло. Оскільки і отриманий матеріал, і піноскло складаються з газонаповнених осередків розділених щонайтоншими перегородками, ці перегородки, не крихкі і пористі, на відміну від піно- і газобетонів, а суцільні, гладкі і оплавлені. За хімічним складом обидва є на 100 % неорганічним матеріалом, не містять і не виділяють жодних небезпечних речовин, на відміну від мінераловатних виробів, не є джерелом ані канцерогенних волокон, ані пари токсичних органічних зв'язуючих сполук. Оскільки властивості піноскла найбільш близькі до властивостей розробленого матеріалу, то порівнювати цей матеріал слід саме з існуючим виробництвом піноскла.

Порівняльні технічні характеристики розробленого теплоізоляційного матеріалу з найбільш поширеними матеріалами, що випускаються промисловістю

Найменування показника	Значення показника				
	Вимоги ДСТУ Б В.2.6-189:2013	Розроблений матеріал	Піноскло	Піносілікат теплоізоляційний	Плита вермікулітова
Щільність, кг/м ³	не більше 800	220-240	120-200	300-500	350-600
Водопоглинання, %	-	28-32	1-10	30-50	10-50
Сорбційна вологість, %	не більше 12	4-5	0,1-1	8-12	15-17
Межа міцності при вигині, МПа	-	0,8-0,9	0,6-0,8	0,08-0,15	0,5-1,5
Межа міцності при 10 %-й деформації стискання, МПа	не менше 0,2	0,6-0,7	0,7-1,5	0,15-0,35	0,6-2,0
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	не більше 0,078	0,05-0,055	0,045-0,085	0,09-0,12	0,09-0,18
Температура експлуатації, °С	не менше 60	-60 – 600	-200-450	-50 – 400	-50-1100
Пористість, %	-	80-85	80-95	80-90	40-50
Характер пор	-	переважно закритий	переважно закритий	переважно відкритий	переважно відкритий
Розмір пор, мм	-	0,4-0,7	0,1-3	0,5-2	0,5-2

Порівняно з піносклом і технологією його виробництва, даний матеріал та пропонована мікрохвильова технологія його спучення характеризуються такими перевагами:

1. Вартість розробленого матеріалу складає приблизно 200 доларів за кубічний метр, вартість піноскла складає в середньому приблизно 280 доларів.

2. Переваги технології отримання вказаного теплоізоляційного матеріалу. Пропонований матеріал можливо спінювати при температурі 110–120 °С під дією мікрохвильового випромінювання, в той час як піноскло отримують випалом скломаси при температурі мінімум 750–850 °С. Тривалість процесу спучування і сушіння розробленого матеріалу – до 10 хв, тоді як

спінювання і випал піноскла триває 1,5–2 год. Пропонована технологія надає можливість не тільки знизити енерговитрати, але й підвищити безпеку виробництва.

3. Спрощена схема спінювання маси з рідкого скла при розкладанні газоутворювача. Механізм реакції газо- і піноутворення піноскла досить складний і не обмежується тільки реакцією окислення вуглецю киснем повітря, більш важливу роль відіграють окислювально-відновні процеси взаємодії вуглецю з компонентами розм'якшеного скла. Застосовують з цією метою відходи звичайного скла або гірські породи з підвищеним вмістом лугів: трахіт, сієніт, нефелін, обсидіан, вулканічний туф. Як газоутворювачі застосовують кам'яно-вугільний кокс, антрацит, вапняк, мармур.

4. Процес отримання пропонованого матеріалу порівняно простий: отримання гранул, приготування зв'язуючого, змішування гранул і зв'язуючого, спучування під дією НВЧ випромінювання. Водночас виробництво якісного блокового (плитного) піноскла (а тим більше фасонних виробів з нього) справедливо вважається вельми технічно непростим завданням. Причиною тому є складність фізико-хімічних процесів безпосередньо при спінюванні, а також строгі вимоги до процесів фіксації і охолодження (відпалу) готової піни.

5. Найвища температура експлуатації піноскла – 450 °С, оскільки за температури ~500 °С починається розм'якшення скла, тоді як пропонований матеріал можна використовувати при температурі до 600 °С без його руйнування.

6. Мікрохвильові технології, обладнання, а також отриманий з їх застосуванням продукт є екологічно чистими, тому що майже немає викидів в атмосферу шкідливих речовин. Мікрохвильова установка створює комфортні умови для обслуговуючого персоналу і не шкодить навколишньому середовищу.

Висновки. Таки чином, завдяки розробленій НВЧ технології отримання теплоізоляційного матеріалу на основі рідкого скла можна досягти рівня властивостей піноскла при зниженні витрат на виробництво. Використання НВЧ випромінювання дало змогу одночасно спучити рідкоскляний гранулят разом із зв'язуючим, завдяки об'ємному прогріву рідкоскляної композиції, та отримати міцний омонолічений матеріал з жорсткою, однорідною та переважно закритопористою структурою.

Терmostійкість та негорючість цих матеріалів дозволяє використовувати їх у теплових промислових установках (промислових печах, казанах, автоклавах тощо). Така теплоізоляція забезпечує значну економію палива, сприяє збільшенню потужності теплових агрегатів і підвищенню їх ККД, забезпечує інтенсифікацію технологічних процесів, зниження витрати основних матеріалів. Теплоізоляція промислових установок, що працюють при високих температурах, сприяє також створенню нормальних санітарно-гігієнічних умов праці обслуговуючого персоналу в гарячих цехах і запобіганню виробничому травматизму.

Список використаних джерел

1. Горлов Ю. П. Технологии теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. Москва: Высшая школа, 1989. 384 с.
2. Сердюк В. Р., Рудченко Д. Г., Августович Б. І. Особливості конструкції стіни з використанням ніздрюватих бетонів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*: наук.-техн. збірник ВНТУ. Вінниця: ВНТУ, 2015. № 1(18). С. 33-38.
3. Дворкін Л. Й., Жидковський В. В. Технологія опоряджувальних теплоізоляційних та гідроізоляційних матеріалів: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2010. 223 с.
4. Демидович Б. К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 248 с.
5. Cellular Glass or Foamed Glass. Trade OF Industrial Insulation. Insulation – Materials, Science and Application. Module 4 – Unit 6. 2014.
6. Ванецев А. С., Третьяков Ю. Д. Микроволновый синтез индивидуальных и многокомпонентных оксидов. *Успехи химии*. 2007. № 76 (5). С. 435-453.
7. Архангельский Ю. С., Девяткин И. И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. Саратов: Саратов. гос. ун-т, 1983. 140 с.

8. Сердюк В. Р., Сидлак А. С. Теоретические предпосылки внедрения СВЧ излучения при активации золы-унос для бетонных смесей. *Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка*: наук.-техн. зб. Київ, 2015. Вип. 56. С. 104–110.
9. Шахин И. Х., Шапоров В. П. Обработка природного карбоната кальция в СВЧ-печи при воздействии поля бегущей электромагнитной волны. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. № 2. С. 96-107.
10. Женжурин И. А. Эффективность микроволновой обработки глинистых композиций при подборе шихты в технологии керамики. *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 60-65.
11. Прохина А. В., Шаповалов Н. А., Латыпова М. М. Модификация поверхности глинистых минералов с высоким содержанием монтмориллонита в электромагнитном поле высокой частоты. *Современные наукоемкие технологии*. 2011. № 1. С. 135-136.
12. Акимов А. Е. Повышение качества асфальтобетона путем обработки битума полем сверхвысокой частоты: автореф. дис... канд. техн. наук: Белгород, 2010. 20 с.
13. Ревенко Б. С. Получение ячеистых бетонов с привлечением СВЧ-технологий. *Молодой учёный*. 2017. № 14 (148). С. 118-119.
14. Компенсация усадки пенобетона / С. Н. Леонович, Д. В. Свиридов, Г. Л. Щукин, А. Л. Беланович, С. А. Карпушенков, В. П. Савенко. *Строительные материалы*. 2015. № 8 (632). С. 3-7.
15. Małachowska A., Stachowicz M., Granat K. Innovative microwave hardening of water-glass containing sandmixes in technical-economic approach. *Archives of foundry engineering*. 2012. № 12. P. 75-80.
16. Microwaves energy in curing process of water glass molding sands / K. Granat, D. Nowak, M. Pigieli, M. Stachowicz, R. Wikiera. *Archives of foundry engineering*. 2007. № 7. P. 183-188.
17. Measurement and Monitoring of Microwave Reflection and Transmission Properties of Cement-Based Specimens / S. Kharkovsky, M.F. Akay, U. C. Hasar, C. D. Atis. *Transactions on instrumentation and measurement*. 2002. № 51 (6). P. 1210-1218.
18. Кудяков А. И., Свергунова Н. А., Иванов М. Ю. Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированной жидкостекольной композиции: монография / под ред. А. И. Кудякова. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. 204 с.
19. Rymar T., Suvorin O. Comparison of properties of thermal insulation materials based on liquid glass obtained by volume and contact grouting. *Питання хімії та хімічної технології*. Дніпро. 2020. № 1. С. 47-52.
20. Rymar T., Suvorin O. The choice of the grouting method for liquid glass granulate while obtaining composite thermal insulation materials. *Functional materials*. Kharkov, 2020. Vol. 27. № 3. P. 611-621.

Римар Тетяна Ернстівна, канд. техн. наук, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>. Тел.: +38(050)1521443. E-mail: rymartatyana1975@gmail.com.

Rymar Tatyana, PhD (Tech.), Associate Professor of Chemical Engineering and Ecology Department, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>. Tel.: +38(050)1521443. E-mail: rymartatyana1975@gmail.com.

Статтю прийнято 07.10.2020 р.

УДК 624.012.45

СУЧАСНІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННІ ПРОГОНОВІ БУДОВИ МОСТІВ МАЛИХ І СЕРЕДНІХ ПРОГОНІВ

Здобувач Р. Б. Каплін

MODERN STEEL-CONCRETE SPAN STRUCTURES OF SMALL AND MEDIUM-SPAN BRIDGES

Postgraduate student R. Kaplin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229530>

Анотація. У статті проведено огляд найбільш розповсюджених сталезалізобетонних прогонових будов сучасних мостів. Розглянуто сферу застосування, переваги та недоліки сталезалізобетонних конструкцій. Переглянуто особливості використання сталезалізобетонних конструкцій у країнах Європи. Також розглянуто варіанти полегшення сталезалізобетонних конструкцій без значної втрати несучої здатності. Подано нову конструкцію сталезалізобетонної прогонової будови з використанням перфорованих металевих елементів та полегшеної залізобетонної плити проїзної частини.

Ключові слова: сталезалізобетон, прогонова будова, перфорована балка, дискретно-континуальні зв'язки, незнімна опалубка.

Abstract. The paper reviews the most common reinforced concrete girder structures of modern bridges used in Ukraine and other countries. The scope, advantages and disadvantages of reinforced concrete structures are considered. The peculiarities of the use of reinforced concrete structures in European countries are reviewed. The most common typical structural solutions of reinforced concrete girder structures used worldwide are given. Options for facilitation of reinforced concrete structures without significant loss of load-bearing capacity are also highlighted. Options for facilitation of structures are presented in the article by lightening the metal load-bearing elements and reducing the weight of the reinforced concrete slab of the carriageway. Reducing the weight of metal elements can be obtained through the use of perforated elements, which can be performed by waste-free technology. To reduce the cost of materials and reduce the weight of the reinforced concrete slab, it is designed lightweight – hollow or ribbed. When removing concrete from the stretched zone, only the ribs of the width required to accommodate the welded frames and ensure the strength of the panels on an inclined cross section are retained. In this case, the plate in the span between the ribs work on the bend as beams of T-section. The top shelf of the plate also works on the local bend between the ribs. During the inspection, the article presents a new design of reinforced concrete girder structure, using perforated box metal elements, made by waste-free technology, and lightweight reinforced concrete slab of the carriageway with hollow formers. Metal blocks are connected to each other by bolts. Metal blocks are made of perforated sheet elements made of waste-free technology. Each block consists of two main beams, transverse diaphragms and a lower plate. The upper belt of the main beams is implemented with the device of horizontal shelves along the entire length of the beams, performing the function of a supporting element for the reinforced concrete slab. Combining all structural elements into a single finished unit is carried out in the factory by automatic welding, which, in turn, allows us to achieve the high factory readiness. The diaphragms of the block are made with a comb along the upper border, on which a profiled steel sheet is placed, which is a fixed formwork for a reinforced concrete slab. The plate is made of non-removable formwork. To

ensure the joint operation of the metal part and the reinforced concrete slab, a system of discrete-continuous connections in the form of rigid stops connected in the longitudinal and transverse directions by reinforcing rods is proposed.

Keywords: reinforced concrete, girder structure, perforated beam, discrete-continuous connections, fixed formwork.

Вступ. На сьогоднішній день сталезалізобетонні (СТЗБ) прогонові будови активно застосовуються при будівництві мостів в усьому світі. Сталезалізобетонні конструкції мають низку переваг, серед яких можна зазначити: зменшену витрату сталі порівняно з металевими системами і, як наслідок, зниження собівартості конструкції; зниження ваги порівняно із залізобетонними системами; підвищені вертикальна та горизонтальна жорсткості конструкції; висока несуча здатність; простота вузлових з'єднань, що значно полегшує процес монтажу.

Однак не позбавлені ці конструкції і недоліків. До основного недоліку СТЗБ конструкцій можна віднести той факт, що, оскільки сталь і бетон різні за своїми фізико-механічними показниками речовини, необхідно влаштовувати об'єднувальні елементи між ними, які мають забезпечити відсутність зсуву однієї частини відносно іншої в місці контакту. Також можуть виникнути специфічні впливи, викликані перепадами температури, повзучістю та усадкою бетону. Крім того, розрахунок подібних конструкцій більш складний. У процесі розрахунку слід урахувувати стадійність роботи, зрушення різнорідних матеріалів у місці зіткнення і інші специфічні фактори. Однак, незважаючи на всі перелічені вище недоліки, міцність і надійність СТЗБ конструкцій, а також їх економічна вигідність, яка проявляється ще на етапі монтажу, а згодом – і в процесі експлуатації, безсумнівно, змушує зробити вибір саме на їхню користь.

За кордоном сталезалізобетонні конструкції відомі як «composite construction» – в англійських країнах або «verbundbau» в країнах з німецькою мовою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як сказано вище, сталезалізобетонні прогонові будови мають низку переваг порівняно з металевими і залізобетонними системами, що дало змогу їм зайняти міцну позицію в діапазоні прогонів 40–80 м. Як правило, вони не можуть конкурувати з повністю металевими і залізобетонними конструкціями при великих і менших прогонах. Але є й винятки, коли сталезалізобетонні конструкції дешевші за аналогічні металеві і залізобетонні аналоги при даних прогонах.

Далеко не всі різноманітні раціональні види і схеми сталезалізобетонних прогонових будов набули до теперішнього часу достатнього поширення. Перед проектувальниками відкрито широке поле діяльності для створення нових, найбільш ефективних конструкцій.

У роботі [1] автор пропонує розділяти сталезалізобетонні мости за способом підтримки залізобетонної плити. Таким чином прогонові будови можна розділити на ті, в яких з/б плита спирається тільки на головні балки, і ті, в яких з/б плита спирається як на головні, так і на поперечні балки.

У роботі [2] подано найбільш поширені сталезалізобетонні конструкції мостів, що використовуються в Німеччині.

У роботі [3] переглянуто типові конструкції сталезалізобетонних прогонових будов, що використовуються в країнах Євросоюзу.

Проблема зниження власної ваги є на сьогоднішній день одним з основних питань при проектуванні сучасних конструкцій [4]. Стосується ця проблематика і сталезалізобетонних конструкцій. Варіантом вирішення цього питання може бути застосування у сталезалізобетонних системах полегшених металевих і залізобетонних елементів.

Визначення мети та завдання дослідження. *Мета роботи* – аналіз найбільш поширених конструкцій сталезалізобетонних прогонових будов мостів та вибір раціонального конструктивного рішення сталезалізобетонної прогонової будови нового типу за критерієм мінімізації власної ваги.

Об'єкт дослідження – сталезалізобетонні прогонові будови мостів малих та середніх прогонів.

Завдання дослідження – розробка ефективного конструктивного рішення

полегшених сталезалізобетонних прогонових будов мостів малих та середніх прогонів з використанням перфорованих металевих балок та полегшеної залізобетонної плити.

Основна частина дослідження. Всю сукупність і різноманітність застосовуваних СТЗБ прогонових будов можна класифікувати за низкою характерних ознак (рис. 1): за зовнішньою статичною схемою; за конструкцією головних балок; за влаштуванням з/б плити.



Рис. 1. Різноманітність СТЗБ прогонових будов

Найбільш характерним за зовнішньою статичною схемою є застосування СТЗБ прогонових будов у балочно-розрізних системах мостів, оскільки в них залізобетонна плита проїжджої частини повністю розташовується в стиснутій зоні і найкращим чином розвантажує сталеву балку. У балочно-нерозрізних системах включення залізобетонної плити в роботу проводиться за допомогою спеціальних заходів, таких як попереднє напруження, штучне регулювання зусиль і т. д. Менше використовуються СТЗБ прогонові будови в консольних і розпірних системах у першу чергу у зв'язку з труднощами індустріалізації будівництва і подорожчання конструкції. Для перекриття великих прогонів мостів широко застосовуються сталезалізобетонні ферми, висячі і вантові

системи. Часто використовується система при обмеженні будівельної висоти прогонової будови – сталезалізобетонні арки.

За конструкцією головних балок найбільшого поширення набули типові сталезалізобетонні прогонові будови із застосуванням балок двотаврового і коробчастого перерізу. Одноплитні прогонові будови можуть складатися як з двох двотаврових балок (рис. 2, а), так і мати балочну конструкцію з багатьма балками в поперечному перерізі (рис. 2, б). Двотаврові балки можуть бути об'єднані поперечними балками в середньому і верхньому рівнях по висоті стінки. В такому випадку залізобетонна плита спирається або тільки на головні балки, або на площину, утворену поясами головних і поперечних балок відповідно [1, 2, 5].

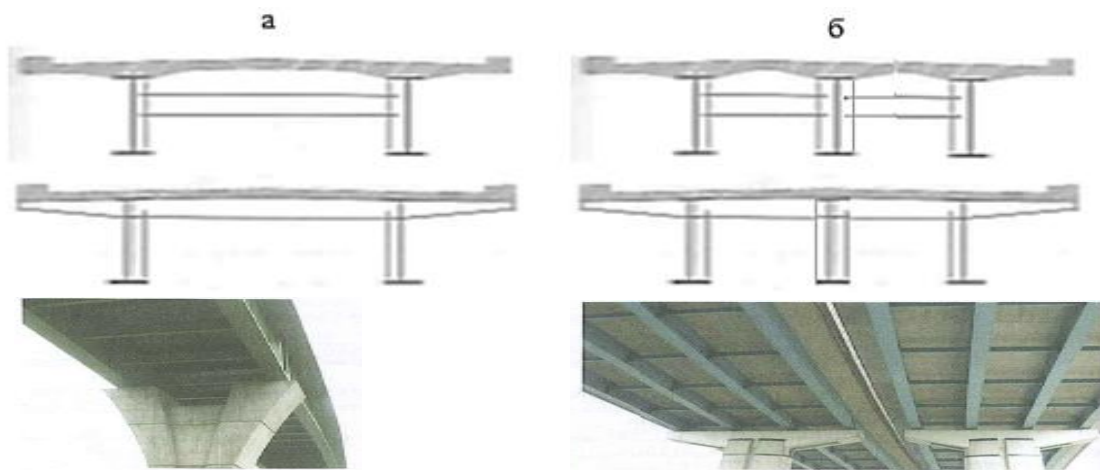


Рис. 2. Типові перерізи прогонових будов сталезалізобетонних мостів з двотавровими балками

Коробчасті прогонові будови можуть мати в поперечному перерізі одну (рис. 3, б) або дві і більше коробчастих балок (рис. 3, а) [1, 2].

Для зведення мостів на автомобільних дорогах високих категорій застосовуються сталезалізобетонні балки коробчастого перерізу зі збільшеними консолями залізобетонної плити (рис. 4). Плита оперта на пояси коробчастої балки і на поздовжні

балки, розташовані між стінками коробки і на консолях. Поздовжні балки підтримані підкосами [2, 3, 5].

Застосовується в сталезалізобетонних прогонових будовах коробчастого перерізу додаткове бетонування в прогоні і на опорах. Балка коробчастого перерізу з обетонуванням нижнього поясу називається подвійною сталезалізобетонною коробкою-балкою.

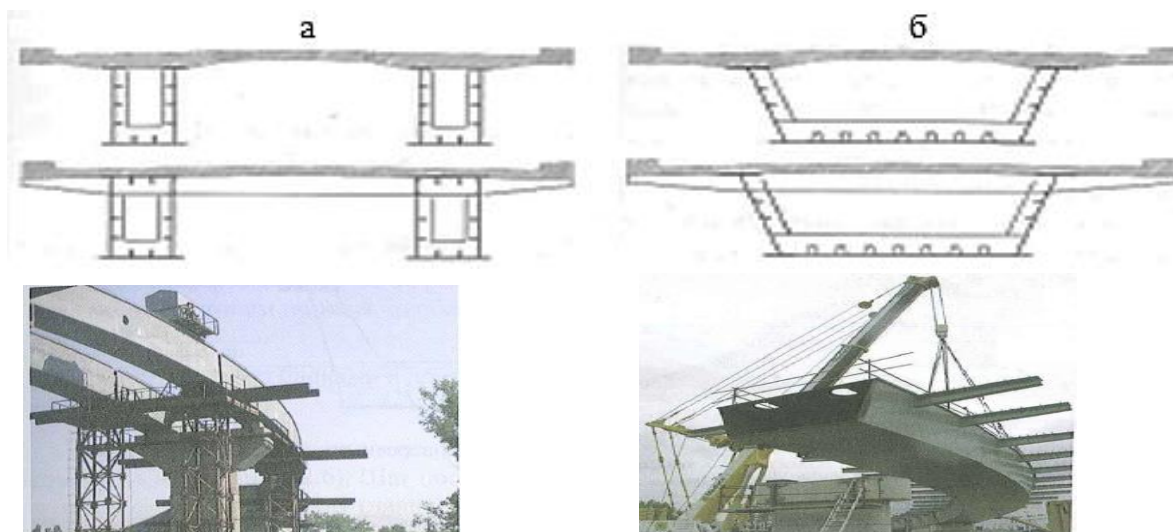


Рис. 3. Типові перерізи прогонових будов сталезалізобетонних мостів з коробчастими балками

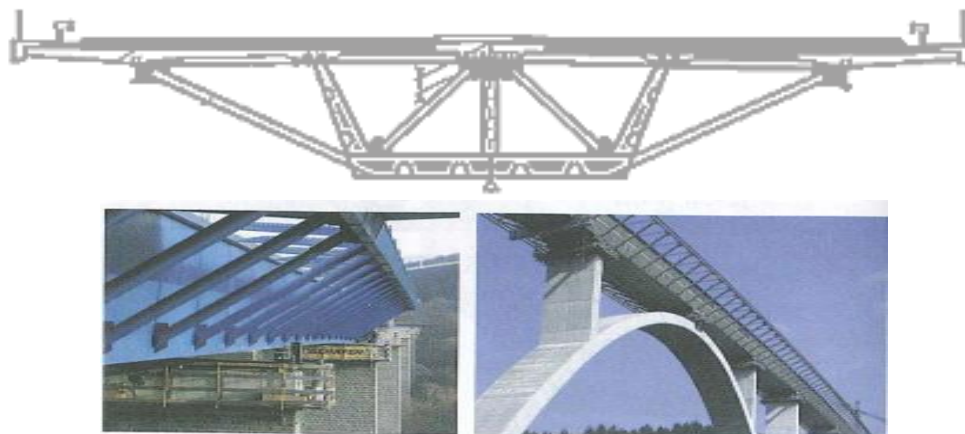


Рис. 4. Сталезалізобетонна балка коробчастого перерізу зі збільшеними консолями залізобетонної плити

Preflex-балки (рис. 5) – це прокатні балки із залізобетонною нижньою полицею. Особливість їх виготовлення полягає в попередньому вигині прокатної балки з наступним бетонуванням нижньої полиці.

Бетонна частина стиснута, таким чином, отримує попереднє напруження, що приводить до підвищення опору вигину і мінімального прогину балок при експлуатації моста [2].



Рис. 5. Сталезалізобетонні прогонові будови із застосуванням preflex-балок

За влаштуванням залізобетонної плити розрізняють прогонові будови із застосуванням монолітних і збірних залізобетонних плит. Кожен із запропонованих варіантів має як позитивні, так і негативні особливості. Зокрема, для бетонування монолітної плити необхідно влаштувати опалубку, виконувати на місці арматурні роботи та укладання бетону. Це робить процес зведення конструкцій більш трудомістким і потребує великих витрат часу порівняно зі збірними плитами, але забезпечує міцний зв'язок бетону з

упорами і повну монолітність плити. Значного поширення останніми роками набуває бетонування по незнімній опалубці, виконаній з профільованого листа. При застосуванні збірної плити значно прискорюються темпи будівництва. Основним недоліком є необхідність досягнення однакової міцності бетону плити і бетону ділянок омоноличування.

Одним з найважливіших питань розвитку сталезалізобетонних прогонових будов, у тому числі при малих та середніх прогонах, є зниження власної ваги,

зменшення витрат матеріалів та працевитрат під час монтажу конструкції. Різновидами полегшених металевих балок є

балки з використанням гофрованої (рис. 6) [6, 7] і перфорованої стінки (рис. 7) [8].



Рис. 6. Сталезалізобетонні прогонові будови коробчастого перерізу з гофрованими стінками

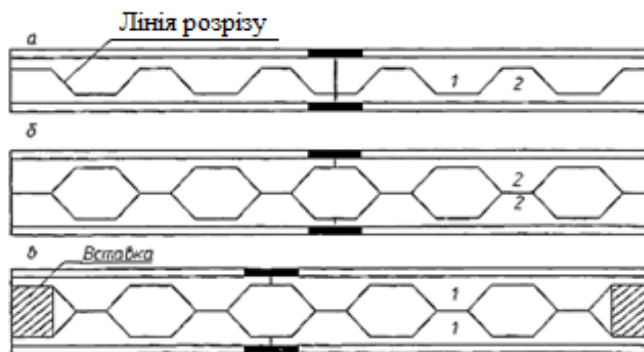


Рис. 7. Балки з перфорованою стінкою

Наскрізна балка, за рахунок збільшення своєї висоти, дає змогу перерозподілити матеріал перерізу, концентруючи його ближче до периферійних волокон, що істотно підвищує такі геометричні характеристики перерізу, як момент інерції і момент опору, а частина матеріалу стінки, близько 30–40 %, у центральній зоні безпечно для конструкції вилучається [9]. Двотаврові балки з перфорованою стінкою порівняно з прокатними забезпечують 20–30 % економії металу і дешевше останніх на 10–18 %. За трудомісткістю виготовлення вони на 25–30 % ефективніші, ніж зварні двотаврові балки за рахунок скорочення операцій

обробки і обсягу зварювання. При використанні таких конструкцій замість ферм економічний ефект досягається за рахунок зниження витрат металу і трудомісткості монтажу, поліпшення умов транспортування, зниження експлуатаційних витрат, високого рівня механізації процесу виготовлення.

Для зменшення витрат матеріалів і зниження власної ваги залізобетонної плити, її проектують полегшеною – пустотною або ребристою. При видаленні бетону з розтягнутої зони зберігають лише ребра, шириною, необхідною для розміщення зварних каркасів і забезпечення міцності панелей по похилому перерізу. При

цьому плита в прогоні між ребрами працює на вигин як балка таврового перерізу. Верхня полиця плити також працює на місцевий вигин між ребрами.

Одним з основних питань при проектуванні обговорюваних споруд є забезпечення раціонального розподілу ресурсу конструкції, що йде на сприйняття власної ваги і корисного навантаження. Не менш важливими є проблеми мінімізації часу і трудомісткості зведення споруди. Задовільнити перелічені вимоги та обмеження можна шляхом створення ефективної модульної конструкції сталезалізобетонної прогонової будови.

У зв'язку з вищесказаним, пропонується конструкція полегшеної сталезалізобетонної прогонової будови оболонкового типу [10, 11]. Конструкція складається з перфорованої металевої замкнутої оболонки і ефективної полегшеної залізобетонної плити проїжджої частини (рис. 8).

Металева частина прогонової будови виконана з поздовжніх металевих блоків коробчастого перерізу, об'єднаних в єдину просторову конструкцію за допомогою високоміцних болтів, розставлених з розрахунковим кроком по довжині прогону (рис. 9) і за рахунок залізобетонної плити проїжджої частини.



Рис. 8. Фрагмент запропонованої сталезалізобетонної прогонової будови

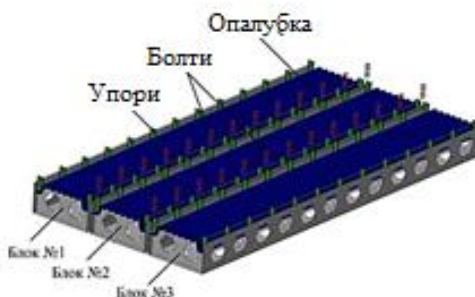


Рис. 9. Об'єднання блоків на високоміцних болтах

Металеві блоки (рис. 10) виготовляються з листових перфорованих елементів, виконаних за безвідходною технологією. До складу кожного блока входять дві головні балки, поперечні діафрагми і нижня пластина. Верхній пояс головних балок реалізований з улаштуванням горизонтальних полиць по всій довжині балок, що виконують функцію підтримувального елемента для залізобетонної плити. Об'єднання всіх конструктивних елементів в єдиний готовий

блок проводиться в заводських умовах за допомогою автоматичного зварювання, що у свою чергу дозволяє говорити про високу заводську готовність конструкції. Діафрагми блока виконані з гребінкою по верхній межі, на яку в подальшому укладається профільований сталевий лист, який є незнімною опалубкою для залізобетонної плити. Нерухомість листа в площині верхнього поясу конструкції забезпечується за допомогою болтів-саморізів і зв'язків зсуву.

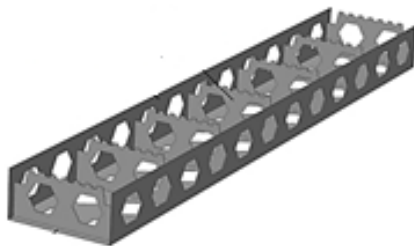


Рис. 10. Металевий блок СТЖБ прогонової будови

Для забезпечення спільної роботи металеві частини прогонової будови із залізобетонною плитою проїжджої частини було запропоновано нову систему дискретно-континуальних зв'язків зсуву (рис. 11). Система представлена у вигляді жорстких упорів, виконаних з відрізків двотаврової балки. Для сприйняття

розтягувальних напружень і перешкоджання відриву плити від металевих балок упори у двох рівнях, у поперечному і поздовжньому напрямках, об'єднані між собою арматурними стрижнями періодичного профілю, на які в подальшому укладаються арматурні сітки залізобетонної плити.

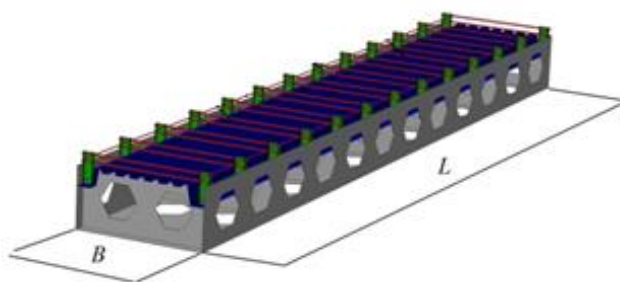


Рис. 11. Дискретно-континуальні зв'язки зсуву

Як залізобетонна плита проїжджої частини можуть бути використані ефективні полегшені плити. Основним принципом створення таких конструкцій є захоронення під час бетонування вкладишів певної форми і розмірів, виконаних з легких, недорогих матеріалів (наприклад пінополістирол). У результаті цього формується монолітна конструкція, яка складається з верхньої та нижньої обшивки, внутрішніх ребер жорсткості і вкладишів-пустотоутворювачів. Збільшення конструктивної висоти плити збільшує циліндричну жорсткість, зменшуючи при цьому витрати арматури та бетону.

Висновки:

1. Розглянуто найбільш розповсюджені конструкції сталезалізобетонних

прогонових будов мостів та варіанти їх полегшення за рахунок зменшення ваги несучих металевих елементів та залізобетонної плити проїжджої частини. Перспективним вбачається використання перфорованих несучих балок, що виготовляються за безвідходною технологією, та полегшених залізобетонних плит, що працюють сумісно завдяки використанню спеціальних зв'язків зсуву.

2. Надано конструкцію полегшеної сталезалізобетонної прогонової будови мостів малих та середніх прогонів, що передбачає використання перфорованих металевих балочних елементів та ефективної плити проїжджої частини із вкладишами-пустотоутворювачами. Таке рішення відрізняється певними позитивними

характеристиками: економія металу складає 20–30 % порівняно з балками суцільного перерізу, що дає змогу економити до 18 % коштів на їх виготовлення, а також знизити трудомісткість виготовлення на 25–30 %.

Водночас застосування пустотоутворювачів дозволяє на 30 % знизити власну вагу плити проїжджої частини та отримати економічний ефект у межах 15 % від сумарної вартості зведення плитної частини.

Список використаних джерел

1. Корнеев М. М. Сталежелезобетонные мосты: теоретическое и практическое пособие по проектированию. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. 400 с.
2. Design and Evaluation of Steel Bridges with Double Composite Action / Sen Rajan, Stroh Steven, Pai Niranjana, Patel Purvik, Golabek Dennis. *Civil and Environmental Engineering Faculty Publications*. 2010. Paper 1. 498 p.
3. Patel Purvik. LRFD design of double composite box girder bridges. Graduate Theses and Dissertations. 2009. 122 p. URL: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/2131> (last accessed: 25.09.2020).
4. Shmukler V., Babaev V. New constructive solutions for building of transport construction facilities. MATEC Web of conferences, 2017. Vol. 116. 02004. 19 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/318319368_New_constructive_solutions_for_building_of_transport_construction_facilities (last accessed: 25.09.2020).
5. Hallmark R., Collin P., Nilsson M. Prefabricated composite Bridges. *World Bridge Construction*. Moscow, Russia, 2010. № 2. P. 71-80.
6. Shear capacity of a novel joint between corrugated steel web and concrete lower slab / S. Wang, J. He, Y. Liu, C. Li, H. Xin. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 163. P. 360–375.
7. Лукин А. О., Суворов А. А. Пролётные строения мостов с гофрированными металлическими стенками. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 2. С. 46–60.
8. Сквозные балки пролетных строений автодорожных мостов / В. М. Картопольцев, А. В. Картопольцев, Е. В. Балашов, А. Г. Боровиков. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. 136 с.
9. Круль Ю. Н. Сталежелезобетонное пролетное строение нового типа: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Круль Юрий Николаевич. Харьков, 2015. 260 с.
10. Efficient construction of the motorway and highway bridge superstructure (experimental studies) / V. Babayev, M. Bekker, V. Shmukler etc. MATEC Web of conferences, 2017. Vol. 116. 02003. URL: https://www.researchgate.net/publication/318319179_Efficient_construction_of_the_motorway_and_highway_bridge_superstructure_experimental_studies (last accessed: 25.09.2020).
11. Rational Design of Structural Building Systems / V. Babaev, I. Ievzerov, S. Evel etc. DOM publishers, Berlin/Germany. 2019. 384 p. URL: <https://dom-publishers.com/collections/handbuch-und-planungshilfe/products/rational-design-for-structural-building-systems>.

Каплін Роман Борисович, завідувач сектора лабораторії будівельно-технічних досліджень Національного наукового центру «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», здобувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: cc33cc22@ukr.net.

Roman Kaplin, head of the sector of the of construction and technical research laboratory of the National Research Center «Hon. Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations», postgraduate student, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: cc33cc22@ukr.net.

Статтю прийнято 12.10.2020 р.

УДК 621. 874

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ КРАНОВОГО ХОДОВОГО КОЛЕСА
З ЕЛАСТИЧНОЮ ВСТАВКОЮ**

Д-р техн. наук Н. М. Фідровська, кандидати техн. наук Є. Д. Слепужніков,
Р. В. Пономаренко, Д. С. Козодой

**JUSTIFICATION OF THE STRUCTURE OF THE CRANE WHEEL WITH ELASTIC
INSERT**

**D. Sc. (Tech.) N. Fidrovska, PhD (Tech.) E. Slepuzhnikov, PhD (Tech.) R. Ponomarenko,
PhD (Tech.) D. Kozodoi**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229771>

***Анотація.** У статті розглянуто модернізовану конструкцію кранового ходового колеса з еластичною вставкою. Метою дослідження є обґрунтування раціональної конструкції ходового колеса на основі визначення динамічних зусиль, які виникають при пересуванні вантажного візка та мосту крана. Отримано залежності для визначення динамічних зусиль, які виникають при пересуванні ходового кранового колеса з урахуванням жорсткості пружного кільця, яке вставлено в ходове колесо. Запропоновано конструкцію і методику розрахунку ходового кранового колеса із завулканізованим кільцем.*

***Ключові слова:** колесо ходове, еластична вставка, мостовий кран, візок вантажний, динаміка, навантаження, коливання.*

***Abstract.** The article considers the modernized design of the crane running wheel with an elastic insert. The purpose of the study is to substantiate the rational design of the running wheel on the basis of determining the dynamic forces that occur when moving the truck and the crane bridge.*

Crane equipment is of great importance for the mechanization of lifting and transport operations in various industries. Bridge cranes perform various lifting and transport operations. Installation and dismantling of equipment and machines. Also take part in the technological process of the metallurgical industry.

The costs associated with the replacement and restoration of the running wheels are 15-17% of the cost of repairing the entire crane. At the same time more than 90% of crane wheels fail due to wear of flanges.

The main tasks for the diagnosis of crane wheels and rail tracks are usually solved during scheduled maintenance by visual inspection of the wheel and rail and identify their wear. But this diagnostic tool does not quite satisfy the modern conditions of the cranes, namely, the compatible condition of the wheels and rails is not assessed, and it is impossible to carry out such control constantly during operation.

Mechanisms for moving bridge cranes have several designs. The mechanism for moving the truck, as a rule, has one drive, which transmits motion to the two drive wheels. The mechanisms of movement of the crane can be with the central and separate drive. The mechanisms of movement with the central drive can be with a low-speed transmission shaft, with a high-speed transmission shaft and with a medium-speed transmission shaft.

With this design, the gearbox shafts are connected to the drive wheel shaft by means of a clutch and a transmission shaft. This impairs the operation of the entire mechanism, because the presence of the transmission shaft increases the complexity of the manufacture of the crane and its weight and requires a very precise installation.

To overcome these shortcomings, a separate drive of the end beams of the bridge is used.

If the load on one of the support beams of the bridge is less than on the other, the engine speed on this support increases and the support begins to run forward relative to the more loaded support. But the first engine begins to receive increased load, which is transmitted through the metal structure of the bridge and unloads the engine of the second support, due to which the speed of the first engine decreases and the speed of the second engine increases until they are equalized.

Thus, in the process of moving the crane with a separate drive is the redistribution of load between the two engines. Although the scheme of the mechanism with separate drives requires two engines, two brakes and two gearboxes, it is the cheapest, light weight and easy to manufacture.

The design of running wheels of cranes and crane carts should exclude a possibility of derailment of wheels. To do this, the running wheels have two side flanges - flanges, which serve to guide the running wheels on the rails.

The dynamic forces that arise when moving the trucks of cranes are quite large and cannot be ignored when designing cranes. Most of all, they are manifested by wear of wheels and rails during the occurrence of distortions on the cranes.

Thus, improving the performance and operational reliability of crane running wheels is a very important task of modern crane construction.

The research technique is based on analytical methods of research of dynamic efforts in the mechanism of movement of the truck of the bridge crane. The decision of three mass dynamic schemes of movement of the cargo cart is received.

The analysis of the received decisions showed that at application of a running wheel with an elastic insert, dynamic factors at movement of the truck decreases. Dependences for determination of dynamic forces which arise at movement of a running crane wheel taking into account rigidity of an elastic ring which is inserted into a running wheel are received. The design and a technique of calculation of a running crane wheel with the vulcanized ring are offered.

Keywords: *running wheel, elastic insert, overhead crane, trolley, dynamics, load, oscillations.*

Вступ. Динамічні зусилля, які виникають при пересуванні вантажних візків вантажних кранів, мають достатньо великі значення і їх неможна не враховувати при проектуванні кранів. Особливо вони проявляються під час зносу коліс і рейок і виникнення перекосів на кранах, які мають значний ресурс.

У загальному вигляді конструкції ходових коліс є достатньо жорсткими і не здатні сприймати поштовхи і перекоси, які виникають внаслідок виникнення відхилень рейкової колії від рекомендованих параметрів, що призводить до появи істотного зносу реборд і рейок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто

динамічні моделі мостового крана. Автори визначали лінійні коливання моделі, яка дає опис вібрації вантажу і тролей під час руху крана і оцінили сили тертя в системі. Оцінено вплив змінності навантаження протягом дії сил опору при пересуванні крана.

Можливість модернізації механізму пересування вантажного візка мостового крана шляхом заміни триступінчастого вертикального циліндричного редуктора на двоступінчастий і окремо винесену зубчасту передачу розглянуто в роботі [2]. Ходове колесо при цьому безпосередньо встановлено на валу колісної пари візка. Автори стверджують, що така структурна схема зменшить втрати енергії і підвищить надійність.

Спосіб розв'язання задачі оптимізації пересування вантажного візка мостового крана на задану відстань, що дає повне подолання некерованих математичних коливань вантажу на канатному підвісі, запропоновано в роботі [3].

Результати експериментальних досліджень появи бокових сил у мостовому крані, які змінюються в процесі руху, наведено в роботі [4]. Було встановлено, що експериментальні значення бокових сил менші, ніж визначені теоретично.

Оптимальний хімічний склад сталі і технологію технічної обробки для ходових коліс шахтних вагонеток, що має підвищити зносостійкість коліс, запропоновано в роботі [5].

Аналіз останніх публікацій показав, що для підвищення довговічності ходових коліс застосовуються більш оптимальний матеріал і термічна обробка, але вони не дають змоги зменшити динамічні навантаження в механізмі підйому, що досягається новою конструкцією ходового колеса з еластичними вставками.

Визначення мети та завдання дослідження. Дослідження принципів функціонування кранового ходового колеса виконувалось з метою вибору на основі проведеного аналізу вдосконаленої його конструкції, яка дозволить суттєво підвищити його ресурс [6, 7]. Удосконалення полягає у зміні конструкції ходового колеса шляхом додавання гумової вставки, що, як наслідок, впливає на зниження напружень у колесі, ходовій частині та реборді [8]. На кранове ходове колесо під дією навантаження впливають статичні і динамічні сили [9]. Статичні сили діляться на вертикальні і горизонтальні [10]. Сили вертикального спрямування обумовлені: для механізму пересування вантажного візка – вагою вантажу і вантажного візка; для механізму пересування мостового крана – вагою мосту і вантажу [11]. Сили горизонтального спрямування обумовлені силами тертя, що виникають між рейкою та колесом.

Динамічні сили проявляються внаслідок розвитку перехідних процесів, у тому числі при перекосах і переході коліс через стики рейкової колії [12, 13].

Метою дослідження є обґрунтування раціональної конструкції ходового колеса на основі визначення динамічних зусиль, які виникають при пересуванні вантажного візка та мосту крана.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- обґрунтувати конструкцію кранового ходового колеса з еластичною вставкою;
- визначити динамічні фактори при роботі механізму пересування вантажного візка на базі тримасової динамічної системи з урахуванням пружності еластичної вставки.

Основна частина дослідження. Запропонована конструкція є тришаровою – два зовнішні шари і один середній. Зовнішні шари зроблені із міцного матеріалу (1), а середній шар є пружним легким матеріалом (2). Така конструкція має не тільки зменшену масу, але й високу міцність і жорсткість, що обумовлено насамперед значенням більшого моменту інерції всієї стінки (рис. 1).

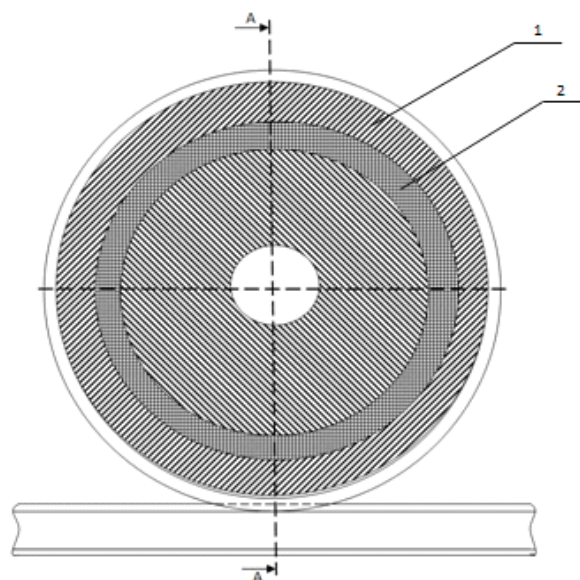


Рис. 1. Конструкція кранового ходового колеса

Якщо порівняти цю конструкцію з класичною одношаровою, то збільшення моменту інерції може сягати багатьох десятків разів.

За умови врахування гнучкого підвісу вантажу отримуємо тримасову систему (рис. 2).

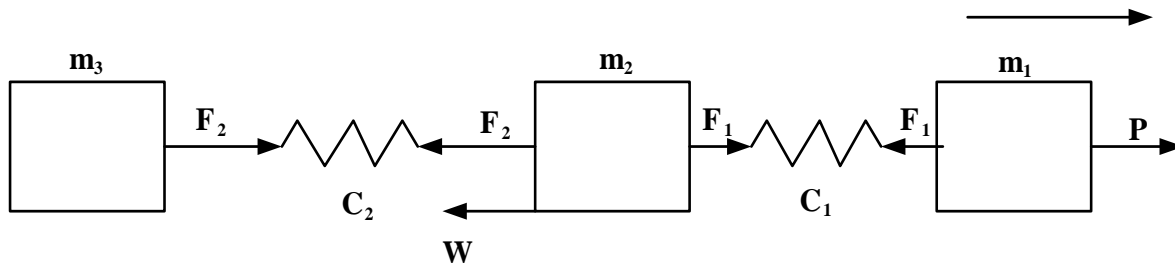


Рис. 2. Тримасова система:

m_1 – маса частин, які обертаються (маса ротора двигуна, моторної муфти, гальмівного шківів та ін.); m_2 – зведена маса поступально-рухомих частин; m_3 – маса вантажу; C_1 – коефіцієнт жорсткості тихохідного трансмісійного вала; C_2 – жорсткість іншого пружного зв'язку

Механізм привода пересування вантажного візка розташований у міжколійному просторі. Обертний момент на тягові колеса передається за допомогою трансмісійного вала. В процесі докладного дослідження динаміки механізму пересування використовуємо розрахункову схему, яка складається з трьох мас і двох пружних зв'язків. Приводячи всі параметри до ходової частини візка і вантажу, отримуємо схему поступального руху (рис. 2), де m_1 – маса частин, що обертаються (маса ротора двигуна, моторної муфти, гальмівного шківів та ін.), m_2 – зведена маса поступально-рухомих частин, m_3 – маса вантажу, C_1 – коефіцієнт жорсткості тихохідного трансмісійного вала, C_2 – жорсткість другого пружного зв'язку.

Розв'язуємо отриману систему:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = P - W - C_1(x_1 - x_2) \\ m_2 \ddot{x}_2 = C_1(x_1 - x_2) - C_2(x_2 - x_3) \\ m_3 \ddot{x}_3 = C_2(x_2 - x_3) \end{cases} \quad (1)$$

Після розв'язання системи (1) отримаємо диференціальне рівняння:

$$\ddot{\ddot{x}}_1 + a_1 \ddot{x}_1 + a_2 x_1 = a_3, \quad (2)$$

де

$$a_1 = \frac{m_1}{2} \left(\frac{C_1}{m_1} + \frac{C_1 + C_2}{m_2} \right) + \frac{m_1(C_1 + C_2)}{2m_2},$$

$$a_2 = \frac{C_1}{2} \left(\frac{2C_1}{m_1} + \frac{2C_2 + C_1}{m_2} \right),$$

$$a_3 = \frac{P - W}{2} \left(\frac{C_1 + C_2}{m_2} - \frac{C_1}{m_1} \right).$$

Розв'язок рівняння (2) знаходимо у вигляді:

$$x_1 = A_1 \sin k_1 t + A_2 \cos k_2 t + A_3 \sin k_3 t + A_4 \cos k_4 t + x_{1\text{hast}}, \quad (3)$$

$$\text{де } x_{1\text{hast}} = \frac{a_3}{a_2}, \quad k_{1,2,3,4} = \pm \sqrt{-\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\frac{a_1^2}{4} - a_2}}.$$

Коефіцієнти A_1, A_2 визначаємо, використовуючи початкові умови:

$$\begin{aligned} x_1(0) &= 0, \dot{x}_1(0) = 0, \\ \ddot{x}_1(0) &= 0, x_2(0) = 0. \end{aligned}$$

Знаходимо коефіцієнти: $A_3=A_4=0$.

$$A_1 = -\frac{a_3 k_2^2}{a_2 (k_2^2 - k_1^2)}, \quad A_2 = \frac{a_3 k_1^2}{k_2^2 - k_1^2}.$$

Після цього рівняння (3) набуває вигляду:

$$x_1 = \frac{a_3}{a_2} \left[1 - \frac{1}{k_2^2 - k_1^2} (k_2^2 \cos k_1 t - k_1^2 \cos k_2 t) \right]. \quad (4)$$

Рівняння руху для другої і третьої мас будуть складати:

$$x_2 = \frac{a_3}{a_2} \left\{ 1 + \frac{1}{k_2^2 - k_1^2} \left[k_2^2 \left(\frac{m_1 k_1^2}{C_1} - 1 \right) \cos k_1 t - k_1^2 \left(\frac{m_1 k_1^2}{C_1} - 1 \right) \cos k_2 t \right] \right\} - \frac{P-W}{C_1}. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x_3 &= \frac{a_3}{a_2} \left\{ 1 - \frac{k_2^2}{k_2^2 - k_1^2} \left[\left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right) \left(\frac{m_1 k_1^2}{C_1} - 1 \right) - \frac{k_1^2 m_2}{C_2} \left(\frac{m_1 k_1^2}{C_1} - 1 \right) + \frac{C_1}{C_2} \right] \cos k_1 t + \right. \\ &\left. + \frac{k_1^2}{k_2^2 - k_1^2} \left[\frac{m_2 k_2^2}{C_1} \left(\frac{m_1 k_2^2}{C_2} + 1 \right) - \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right) \left(\frac{m_1 k_2^2}{C_1} - 1 \right) + \frac{C_1}{C_2} \right] \cos k_2 t - \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right) \frac{P-W}{C_1} \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

Зусилля в пружних зв'язках знаходимо з виразу:

$$F_1 = P - \frac{a_3 k_1^2 k_2^2}{a_2 (k_2^2 - k_1^2)} (\cos k_1 t - \cos k_2 t). \quad (7)$$

Проведемо розрахунок для мостового крана вантажопідйомністю 5 т прогоном 22,5 м, висотою підйому 8 м, режимом роботи 7К. Результати розрахунків подано на рис. 3–6, де ряд 2, 4, 6, 8 відповідає стандартному (штатному) ходовому колесу, ряд 3, 5, 7, 9 відповідає конструкції колеса з пружним кільцем.

У результаті розрахунків отримуємо значення коефіцієнта динамічності для стандартного ходового колеса, який

дорівнює 1,65, і для тришарового колеса з пружною вставкою, який дорівнює 1,1.

Як бачимо, при застосуванні на вантажному візку ходових коліс запропонованої конструкції швидкість коливань вантажу зменшується в 4,8 разу, а прискорення – в 6,0 разу. Також така конструкція коліс дає змогу знизити швидкість коливань металоконструкцій у 1,2 разу, а прискорення – в 1,43 разу.

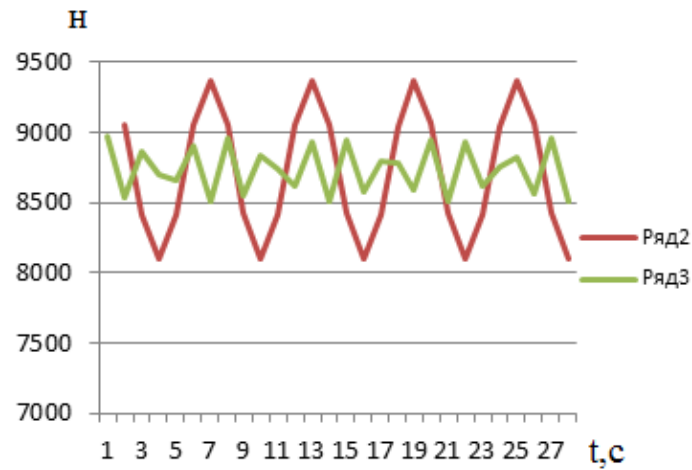


Рис. 3. Графіки сил F_1

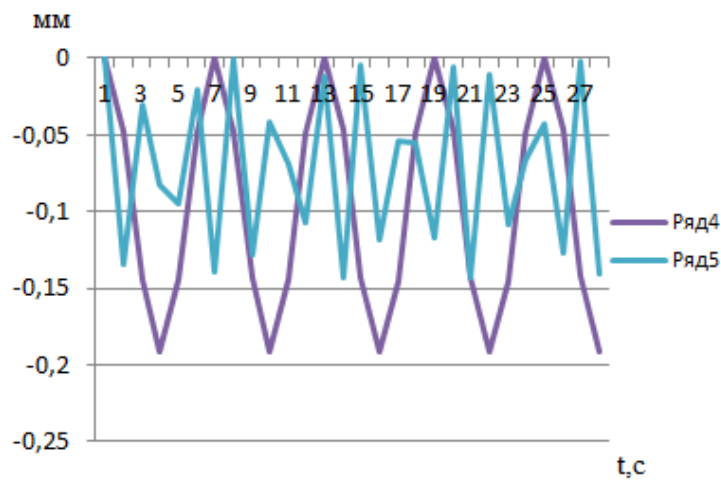


Рис. 4. Графік коливання X_1

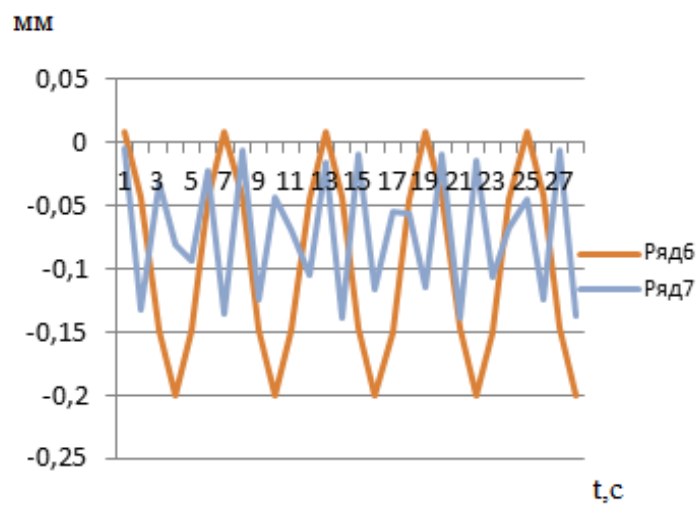
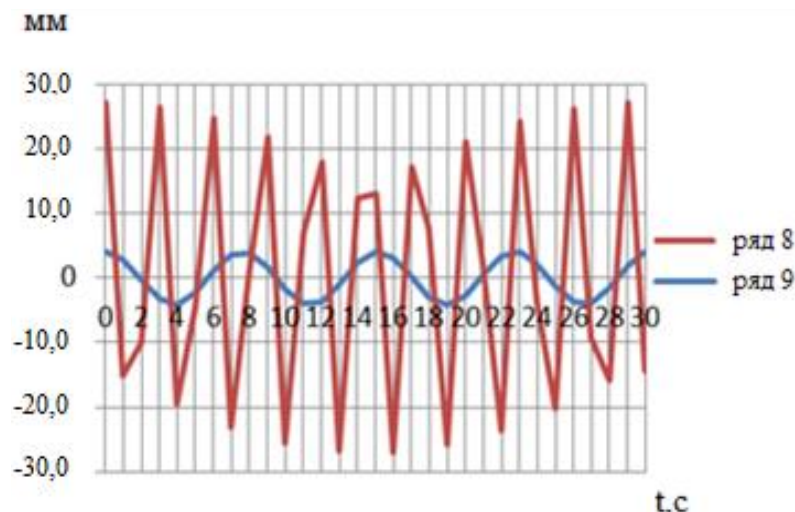


Рис. 5. Графік коливання X_2

Рис. 6. Графік коливання X_3

Таким чином, отримані рішення тримасової системи дозволяють визначати з достатньою точністю динамічні параметри навантажень, які виникають під час пересування ходових коліс вантажних візків кранів мостового типу. Отримані розрахунки довели, що застосування ходового колеса із завулканізованим кільцем значно зменшує динамічні навантаження.

Висновки. Проведено обґрунтування модернізованої конструкції кранового ходового колеса з еластичною вставкою. Запропоновано конструкцію кранового

ходового колеса, яка складається з декількох шарів.

Визначено динамічні фактори при роботі механізму пересування вантажного візка на базі тримасової динамічної системи з урахуванням пружності еластичної вставки. Отримано значення коефіцієнта динамічності для штатного та вдосконаленого коліс. Для штатного ходового колеса значення коефіцієнта динамічності складало 1,65, для ходового колеса з пружною вставкою коефіцієнт динамічності складає 1,1.

Список використаних джерел

1. Raksha S. V., Anofriev P. G., Bohomaz V. M., Kuropiatnyk O. S. Mathematical and S-models of cargo oscillations during movement of bridge crane. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2019. № 2. P. 108–115. URL: <https://DOI:10.29202/nvngu/2019-2/16>.
2. Артамонов Д. Н., Петров А. М. Модернизация механизма передвижения тележки мостового крана. *Молодой исследователь*. 2017. Вып. 5 (8). С. 12–16. URL: http://mid-journal.ru/upload/iblock/18e/2_artamonov_12_16.pdf.
3. Korytov M. S. Bridge crane trolley movement in the anti-sway mode. *Probl. Upr.* 2017. Issue 2. P. 10–16. URL: <http://mi.mathnet.ru/eng/pu1015>.
4. Zelic A., Zuber N., Sostakov R. Experimental determination of lateral forces caused by bridge crane skewing during travelling. *Eksplatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2018. Vol. 20. No. 1. P. 90–99. URL: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.1.12>.
5. Gankevich V. F., Gryaznova L. V., Lisnyak A. G. Ways to enhance the reliability of wheel pairs of locomotive transport. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2012. № 5. P. 76–79. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/ru/component/jdownloads/finish/35-05/565-2012-5-gankev/0>.

6. Fidrovskaya N., Slepuzhnikov E., Perevoznik I. A contact problem solution with taking into account shear deformations. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2019. VII (23), Issue 193. P. 80–81. URL: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2019-193VII23-20>.

7. Слепужников Е. Д. Расчет трехслойной цилиндрической конструкции. *Горная механика и машиностроение*. 2016. № 1. С. 62–65. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7460>.

8. Increase of operating reliability of the travel wheel using the use of the elastic inserts / N. Fidrovskaya, E. Slepuzhnikov, O. Larin, I. Varchenko, V. Lipovyi, K. Afanasenko, S. Harbuz. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. Issue № 5 (30). P. 69–79. URL: <http://doi:10.21303/2461-4262.2020.001387>.

9. Molyneux-Berry P., Davis C., Bevan A. The Influence of Wheel/Rail Contact Conditions on the Microstructure and Hardness of Railway Wheels. *The Scientific World Journal*. Volume 2014. Article ID 209752. 2014. P. 1–16. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/209752>.

10. An analytical mathematical method for calculation of the dynamic wheel–rail impact force caused by wheel flat / M. Bogdevičius, R. Žygienė, G. Bureika, S. Dailydka. *Vehicle system dynamics*. Issue 54 (5). 2016. P. 689–705. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1153114>.

11. Слепужников С. Д. Визначення динамічних навантажень при пересуванні вантажного візка мостового крана. *Машинобудування*. 2015. № 16. С. 34–37. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mashbud_2015_16_7.

12. Ren Z., Iwnicki S., Xie G. A new method for determining wheel–rail multi-point contact. *Vehicle System Dynamics*. 2011. Issue 49 (10). P. 1533–1551. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.539237>.

13. Shabana A. A., El-Ghandour A. I., Zaaza K. E. Study of the effect of the spiral geometry on wheel/rail contact forces. *Journal of Multi-body Dynamics*. 2011. 225 (2). P. 111–125. URL: <https://doi.org/10.1177/1464419311406626>.

Фідровська Наталія Миколаївна, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID iD: 0000-0002-5248-273X. Тел.: (097) 396-98-83. E-mail: nfidrovskaya@ukr.net.

Слепужников Євген Дмитрович, канд. техн. наук, викладач кафедри спеціальної хімії та хімічної технології Національного університету цивільного захисту України. ORCID iD: 0000-0002-5449-3512. Тел.: (067)922-99-14. E-mail: ors2011@ukr.net.

Пономаренко Роман Володимирович, канд. техн. наук, с.н.с., заступник начальника кафедри пожежної та рятувальної підготовки Національного університету цивільного захисту України. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6300-3108>. Тел.: +38(066)-029-71-21. E-mail: prv@nuczu.edu.ua.

Козодой Дмитро Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3615-1815. Тел.: +38(066)519-47-31. E-mail: Dmitry_1980@ukr.net

Fidrovskaya Nataliia, Dr. Sc. (Tech.), professor of the department of construction and road machines, Kharkiv national automobile and road university. ORCID iD: 0000-0002-5248-273X. E-mail: nfidrovskaya@ukr.net.

Slepuzhnikov Evgen, PhD (Tech.), lecturer at the department of special chemistry and chemical technology of the National university of civil defense of Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-5449-3512. E-mail: ors2011@ukr.net.

Ponomarenko Roman, PhD (Tech.), Deputy Head of the Department of fire and rescue training National university of civil defence of Ukraine. ORCID Number: <https://orcid.org/0000-0002-6300-3108>. Email: prv@nuczu.edu.ua.

Kozodoi Dmytro, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of labor protection and environment, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3615-1815. E-mail: Dmitry_1980@ukr.net.

Статтю прийнято 29.10.2020 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.222.5

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ПОШУКУ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ
НА ВІДНОВЛЕННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ РІЗНИХ КАТЕГОРІЙ**

Д-р техн. наук А. В. Прохорченко, асп. Д. О. Гурін,
магістранти І. О. Лагута, В. О. Суницька

**IMPROVEMENT OF THE PROCEDURE FOR SEARCHING RATIONAL TIME
RESERVES FOR RECOVERY OF TRAIN MOVEMENT OF DIFFERENT CATEGORIES**

D. Sc. (Tech.) A. Prohorchenko, postgraduate student D. Gurin, master I. Lahuta,
master V. Sunytska

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229812>

***Анотація.** У статті запропоновано удосконалену процедуру пошуку раціонального резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій залежно від кількості затриманих поїздів на основі епідеміологічної SIR-моделі. Проведено експериментальні дослідження впливу затримки пасажирських поїздів на надійність нормативного графіка руху. Визначено раціональні резерви часу для пасажирських, приміських та вантажних поїздів. Застосування запропонованого підходу дасть змогу покращити роботу залізничної системи України та підвищити рівень надійності графіка руху і, як наслідок, покращить показники якості планування перевезень.*

***Ключові слова:** графік руху поїздів, поїзд, резерв, час на відновлення руху, розповсюдження затримок.*

***Abstract.** This article improves the procedure for finding rational time reserves for the resumption of trains of different categories depending on the number of detained trains on the basis of the epidemiological SIR-model. A modified epidemiological SIR-model has been implemented for the experimental railway line, which allows to take into account the interaction of trains of different priorities in the train schedule and the possibility of resumption of delayed trains due to the set time reserve. The adjustment of the delay rate transfer coefficients on the real data of train delays at the line has been performed. The solution of the system of differential equations of the SIR-model is proposed to be performed by the numerical Runge-Kutta method of the 4th order. Experimental studies of the impact of passenger train delays on the reliability of the regulatory schedule have been conducted. Experimental studies of the impact of passenger train delays on the reliability of the regulatory schedule have been conducted. The dependences of the number of detained trains of different categories on the change in the amount of time reserve for the resumption of trains of different categories are obtained. Rational time reserves for passenger, suburban and freight trains have been established. These results were expertly assessed and confirm the adequacy of the obtained decisions in the practice of developing a regulatory schedule of trains at JSC Ukrzaliznytsia. The application of the proposed approach will automate the complex process of finding rational values of compensation time in the threads of trains of different categories on the railway line and, as a consequence, increase the level of reliability of the regulatory train schedule.*

***Keywords:** train schedule, train, reserve, time to resume traffic, propagation delays.*

Вступ. В умовах підвищення конкурентоспроможності логістики залізничних перевезень в Україні одним із завдань є підвищення точності планування руху поїздів. Одним із головних критеріїв при виборі виду транспорту для перевезення пасажирів або вантажів є його рівень пунктуальності та надійності. Графік руху поїздів (ГРП) є одним з важливих нормативних планів, що визначає рівень пунктуальності, надійності та характеризує ефективність роботи залізничної системи. Залізнична система України працює без встановленого графіка руху вантажних поїздів і має досить ненадійний рівень надання послуг з перевезення. За таких умов актуальним є закладання раціонального резерву часу в графік руху поїздів для дотримання точності і пунктуальності його виконання. Незважаючи на ключову роль, яку відіграє резервний час у розробленні розкладів, найчастіше на практиці використовується експертний підхід, що не дає змоги обґрунтовано вибрати раціональні параметри величини резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій. У цьому дослідженні запропоновано проаналізувати вплив поїздів різних категорій та величини їх резерву часу на надійність графіка руху на дільниці [1]. Отже, дослідження, присвячені теоретичному обґрунтуванню впливу кількості затриманих поїздів на раціональну величину резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Закладання раціонального резерву часу в графік руху поїздів (ГРП) є складним завданням для залізниць, тому що слід задовольнити потреби часу перевезення не тільки пасажирів, а й підприємців та самої залізниці для уникнення збитковості. У роботі [2] розглянуто проблему втрати часу руху поїздів через обмеження

швидкості на окремих ділянках на основі аналітичного підходу. Але даний метод при встановленні резерву не враховує категорії пасажирських поїздів та раптову появу обмеження швидкості через незаплановані ремонти колії. На залізничний транспорт має вплив велика кількість дестабілізаційних факторів, тому важливо у графік обороту составів пасажирських поїздів закладати резерви часу для вчасного прибуття поїздів на станції призначення. При цьому недостатні величини резервів можуть викликати збої в технологічному процесі перевезення, конфліктні ситуації при зайнятті перегонів і значні вторинні затримки, а зайві резерви викликають погіршення показників використання локомотивів, локомотивних бригад, вагонів, станційних колій та неефективне використання пропускнуої спроможності перегонів [3]. Дослідження [4] спрямоване на аналіз визначення затримок поїздів, а також встановлення резервів часу, які необхідно закладати у маршрут прямування вантажних поїздів за розкладом на основі статистичного підходу. Цей метод є досить неточним та узагальнювальним.

Для визначення раціональних величин резерву на станціях у роботі запропоновано програмний інструмент TNV-Prepare, який дає змогу аналізувати в залізничній мережі Нідерландів відхилення в циклічних розкладах руху поїздів та виявляти недоліки розкладу [5]. У Нідерландах поїзди курсують в основному за циклічним графіком – повторення одного і того самого часу прибуття і відправлення щогодини, за винятком додаткових пасажирських поїздів у години пік і вантажних поїздів, які курсують між регулярними поїздами [5]. Однак у залізничній системі України пасажирські поїзди курсують за нециклічним графіком руху, а вантажні взагалі без дотримання розкладу руху, що не

дає змоги застосувати даний підхід до України. Графічне зображення подій із синхронізацією руху використовується в ефективному алгоритмі графа, який обчислює розповсюдження затримок поїздів з використанням реалізації лінійної системи в алгебрі $\max\text{-plus}$, що включає динаміку нульового порядку, та відповідає розповсюдженню затримок протягом періоду розкладу [6]. Метод розкладання, побудований на лінійності, вводиться для окремого виду структурних та початкових затримок, але такий алгоритм може бути використаний тільки на великомасштабних мережах циклічного графіка руху. У роботі [7] запропоновано вдосконалену імітаційну модель залізничного напрямку, яка відображає процес пропуску поїздів по ділянках і через залізничні станції і дає можливість оцінити вплив використання пропускнуої спроможності на тривалість руху поїздів.

Цікавим підходом для моделювання розповсюдження затримок поїздів у ГРП є епідеміологічні математичні SIR-моделі, які вперше набули поширення в галузі медицини [8, 9] і вже були використані в економічній галузі [10]. Нам відоме одне дослідження в галузі залізничного транспорту [11], де надано математичну модель на основі епідеміологічної SIR-моделі, яка враховує швидкість поширення заторів міської залізниці і спрямована на вивчення поширення перевантаження всієї мережі в умовах перенасичення.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета цього дослідження полягає у пошуку раціонального резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій залежно від кількості затриманих

пасажирських поїздів на основі епідеміологічної моделі. Це дозволить підвищити рівень надійності нормативного графіка руху поїздів та мінімізувати кількість затриманих поїздів пріоритетного напрямку. Для досягнення мети в роботі поставлено завдання проаналізувати експериментальним шляхом кількість пасажирських, приміських та вантажних поїздів, що затримуються за рахунок варіювання часу на відновлення руху, та дослідити вплив поїздів різних категорій та величини їх резерву часу на надійність нормативного графіка руху поїздів.

Основна частина дослідження. В цьому дослідженні для пошуку раціонального резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій залежно від кількості затриманих пасажирських поїздів запропоновано використати модифіковану математичну епідеміологічну модель [12]. У цій моделі загальне число поїздів розподілено на три стани, кожен з яких відіграє важливий етап у процесі розповсюдження затримки у графіку руху поїздів: $S(t)$ – кількість поїздів, які в момент часу t рухаються за графіком, але теоретично можуть бути затримані при русі; $I(t)$ – кількість поїздів, які в момент часу t рухаються із затримкою за графіком та впливають на рух поїздів інших категорій; $R(t)$ – кількість поїздів, які в момент часу t прямували із затримкою, але виконали нагін та рухаються за графіком.

В явному вигляді математичну SIR-модель для трьох категорій поїздів: $r = 1$ – пасажирські поїзди; $r = 2$ – приміські поїзди; $r = 3$ – вантажні поїзди записано нижче:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dS^{r=1}(t)}{dt} = -(\beta^{1,1}S^1(t)I^1(t) + \beta^{1,2}S^1(t)I^2(t) + \beta^{1,3}S^1(t)I^3(t)); \\
 \frac{dS^{r=2}(t)}{dt} = -(\beta^{2,1}S^2(t)I^1(t) + \beta^{2,2}S^2(t)I^2(t) + \beta^{2,3}S^2(t)I^3(t)); \\
 \frac{dS^{r=3}(t)}{dt} = -(\beta^{3,1}S^3(t)I^1(t) + \beta^{3,2}S^3(t)I^2(t) + \beta^{3,3}S^3(t)I^3(t)); \\
 \frac{dI^{r=1}(t)}{dt} = \beta^{1,1}S^1(t)I^1(t) + \beta^{1,2}S^1(t)I^2(t) + \beta^{1,3}S^1(t)I^3(t) - r^1I^1; \\
 \frac{dI^{r=2}(t)}{dt} = \beta^{2,1}S^2(t)I^1(t) + \beta^{2,2}S^2(t)I^2(t) + \beta^{2,3}S^2(t)I^3(t) - r^2I^2; \\
 \frac{dI^{r=3}(t)}{dt} = \beta^{3,1}S^3(t)I^1(t) + \beta^{3,2}S^3(t)I^2(t) + \beta^{3,3}S^3(t)I^3(t) - r^3I^3; \\
 \frac{dR^{r=1}(t)}{dt} = -\gamma^1I^1, \\
 \frac{dR^{r=2}(t)}{dt} = -\gamma^2I^2; \\
 \frac{dR^{r=3}(t)}{dt} = -\gamma^3I^3.
 \end{array} \right. \quad (1)$$

де $S^r(t)$ – кількість поїздів, які в момент часу t рухаються за графіком відповідно до їх категорій r ; $\beta^{r,m}$ – швидкість розповсюдження затримки від їх категорій r до поїздів категорій m , де $r = m$ та $r, m \in R$; $I^r(t)$ – кількість поїздів, які в момент часу t рухаються із затримкою за графіком відповідно до їх категорій r ; $R^r(t)$ – кількість поїздів відповідно до їх категорій r , які в момент часу t прямували із затримкою, але виконали нагін і рухаються за графіком; γ^r – швидкість поглинання затримки поїздів відповідно до їх категорій r (резерв) [13].

Система рівнянь має умову нормування виду $N^r = S^r(t) + I^r(t) + R^r$, де N^r – загальна кількість поїздів класу r на дільниці; $N = \sum_r N^r$, N – загальна кількість поїздів усіх класів на дільниці.

Початкові умови для системи (1) рівні $(S^r(t_0), I^r(t_0), 0)$, де S^r, I^r – кількість сприятливих та затриманих поїздів у класі r на дільниці при $t = 0$ відповідно. Розв'язок системи диференціальних рівнянь SIR-моделі запропоновано виконати чисельним методом Рунге–Кутта 4-го порядку [14].

У межах експериментальних досліджень у роботі використана налаштована SIR-модель на дільниці Л–С одного із залізничних полігонів АТ «Укрзалізниця» [12]. На основі математичної моделі (1) початковими умовами для проведення дослідження залежності кількості затриманих поїздів від резервів часу в нитках графіка руху є: $S_1(t_0) = 4$ (пасажирські поїзди, що прямують за графіком), $S_2(t_0) = 4$ (приміські поїзди, що прямують за графіком), $S_3(t_0) = 32$ (вантажні поїзди, що прямують за графіком), $I^r(t_0) = 5$ (затримані пасажирські поїзди, що мають вплив на прямування

поїздів інших категорій). У процесі моделювання були закладені різні резерви часу для пасажирських поїздів, що дає змогу оцінити кількість затриманих поїздів різних категорій залежно від величини закладеного часу резерву. Початкові умови параметрів

$\gamma^1 = 0,04$ год; $\gamma^2 = 0,0667$ год; $\gamma^3 = 0,025$ год. У межах етапів моделювання один із параметрів γ^r ставав змінним, інші фіксувались відповідно до початкових умов. Результати дослідження подано у табл. 1.

Таблиця 1

Результати моделювання кількості затриманих поїздів різних категорій від закладених резервів часу в нитках пасажирських поїздів

Пасажирські поїзди, $r = 1$	Приміські поїзди, $r = 2$	Вантажні поїзди, $r = 3$	Резерв часу, хв
0,032	1,400	1,369	18,0
0,086	1,384	1,386	12,0
0,551	1,366	1,430	6,0
0,001	1,789	1,239	4,0
1,683	1,356	1,483	3,0
2,117	1,356	1,356	2,4
2,489	1,352	1,511	2,0
2,997	1,351	1,528	1,5
5,0	0,0	0,0	0,0

На основі табл. 1 побудовано графік залежності кількості затриманих поїздів різних категорій від зміни величини резерву

часу на відновлення руху пасажирських поїздів, що подано на рис. 1.



Рис. 1. Залежність кількості затриманих поїздів різних категорій від зміни величини резерву часу на відновлення руху пасажирських поїздів

Найбільш раціональним резервом на відновлення руху пасажирських поїздів є час 4 хв, тому що збільшення часу призведе до збільшення кількості затриманих пасажирських поїздів (вони мають найвищу пріоритетність), а кількість затриманих приміських та вантажних поїздів майже не зміниться. При резерві 4 хв кількість затриманих пасажирських поїздів сягає нуля, приміських – 1,79 поїзда, вантажних – 1,24 поїзда. Якщо ж резерв часу взяти менше 4 хв, тоді кількість затриманих пасажирських поїздів значно збільшиться. Це призведе до порушення надійності та пунктуальності графіка руху поїздів.

Аналогічно проводимо дослідження для приміських та вантажних поїздів. Результати моделювання кількості затриманих поїздів різних категорій від закладених резервів часу в нитках приміських поїздів наведено у табл. 2.

Відповідно до рис. 2 найбільш раціональним резервом на відновлення руху приміських поїздів через затримку пасажирських поїздів є час 6 хв. Якщо взяти час меншим, то це призведе до збільшення кількості затриманих як пасажирських, так і поїздів інших категорій, а при збільшеній величині резерву кількість затриманих поїздів найвищого пріоритету майже не зміниться, а пропускна спроможність станції знизиться.

Результати моделювання кількості затриманих поїздів різних категорій від закладених резервів часу в нитках вантажних поїздів наведено у табл. 3. Залежність кількості затриманих поїздів різних категорій від зміни величини резерву часу на відновлення руху вантажних поїздів подано на рис. 3.

Згідно з графіком на рис. 3 найбільш раціональний резерв на відновлення руху вантажних поїздів, які мають найнижчу пріоритетність серед інших категорій поїздів, складає 12 хв. У процесі збільшення або зменшення величини резерву незмінною залишається кількість затриманих пасажирських та приміських поїздів, а число вантажних поїздів при закладеному резерві 12 хв становить 0,65, що значно нижче, ніж при 6 хв.

Вищенаведені результати моделювання дали змогу чисельно оцінити вплив закладеного резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій на кількість затриманих поїздів на дільниці. Отже, найбільш раціональним резервом часу в графіку руху для пасажирських поїздів є 4 хв, для приміських – 6 хв, для вантажних – 12 хв. Ці результати були експертно оцінені і підтверджують адекватність отриманих рішень у практиці розроблення нормативного графіка руху поїздів на АТ «Укрзалізниця».

Таблиця 2

Результати моделювання кількості затриманих поїздів різних категорій від закладених резервів часу в нитках приміських поїздів

Пасажирські поїзди, $r=1$	Приміські поїзди, $r=2$	Вантажні поїзди, $r=3$	Резерв часу, хв
1,596	0,134	0,537	18,0
1,616	0,265	0,759	12,0
1,657	0,835	1,213	6,0
1,683	1,356	1,483	4,0
1,700	1,756	1,657	3,0
1,711	2,059	1,778	2,4
1,720	2,306	1,871	2,0
1,732	2,629	1,986	1,5
5,0	0,0	0,0	0,0

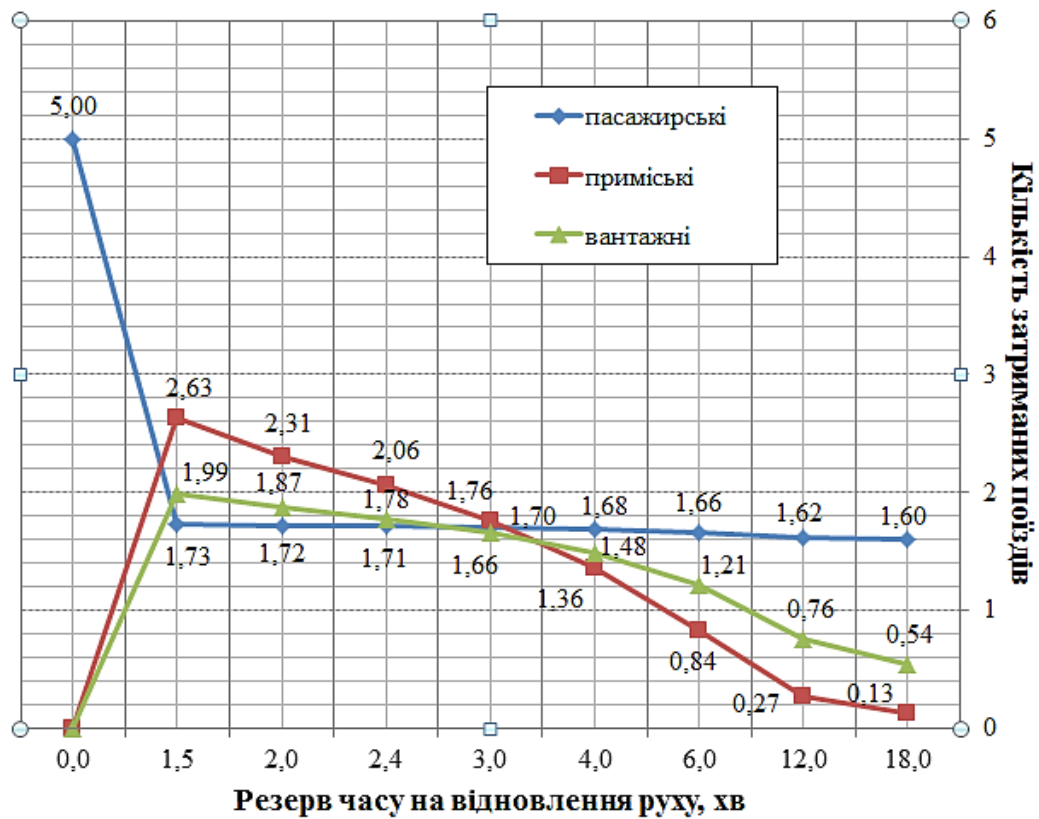


Рис. 2. Залежність кількості затриманих поїздів різних категорій від зміни величини резерву часу на відновлення руху приміських поїздів

Таблиця 3

Результати моделювання кількості затриманих поїздів різних категорій від закладених резервів часу в нитках вантажних поїздів

Пасажи́рські поїзди, $r = 1$	Приміські поїзди, $r = 2$	Вантажні поїзди, $r = 3$	Резерв часу, хв
1,680	1,356	0,366	18,0
1,681	1,356	0,654	12,0
1,683	1,356	1,483	6,0
1,684	1,356	2,072	4,0
1,685	1,356	2,481	3,0
1,685	1,356	2,775	2,4
1,686	1,356	3,005	2,0
1,686	1,356	3,299	1,5
5,0	0,0	0,0	0,0

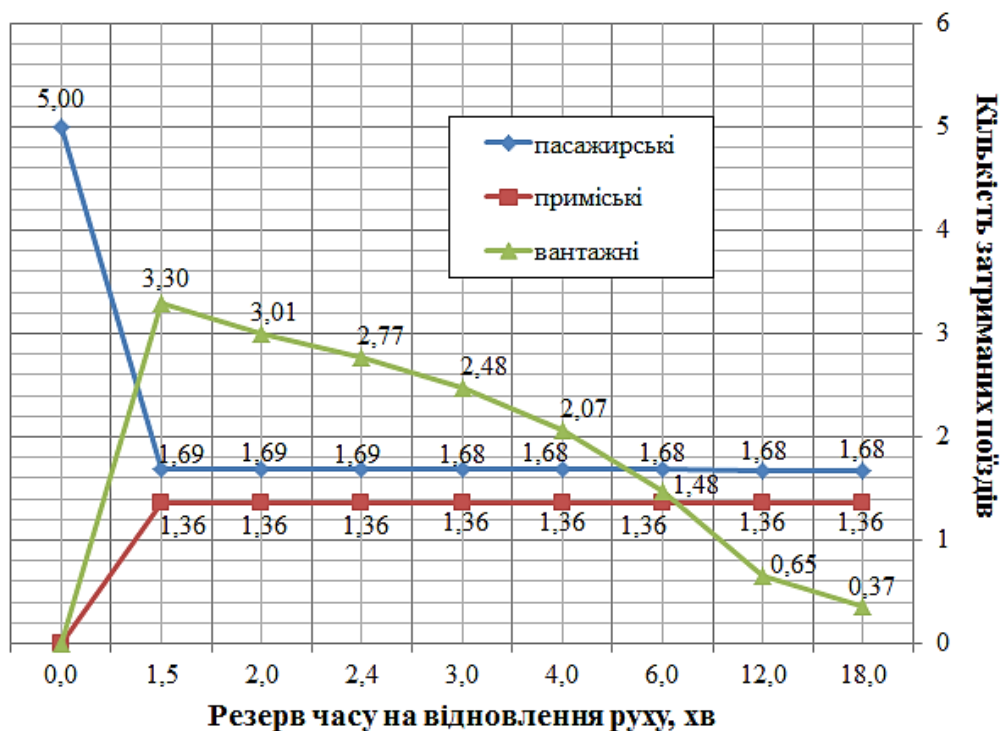


Рис. 3. Залежність кількості затриманих поїздів різних категорій від зміни величини резерву часу на відновлення руху вантажних поїздів

Висновки. Запропонована процедура на основі епідеміологічної SIR-моделі дає змогу визначити експериментальним шляхом найбільш раціональні резерви часу на відновлення руху поїздів різних категорій залежно від кількості затриманих пасажирських поїздів. Встановлено, що для дільниці Л–С раціональним резервом часу на відновлення в нитці графіка руху для пасажирських поїздів є 4 хв, для приміських – 6 хв, для вантажних – 12 хв. Проведене дослідження дозволило теоретично

обґрунтувати вплив кількості затриманих поїздів та визначити раціональну величину резерву часу на відновлення руху пасажирських, приміських та вантажних поїздів, що раніше не вдавалося зробити. Такий підхід може стати інструментом для побудови нормативних графіків. Це дасть змогу підвищити рівень надійності нормативного графіка руху поїздів та мінімізувати кількість затриманих поїздів пріоритетного напрямку.

Список використаних джерел

1. Butko T., Prokhorchenko A., Golovko T., Prokhorchenko G. 2018 Development of the method for modeling the propagation of delays in noncyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol.1/3(91). P. 30–39.
2. Курган М. Б., Маркова О. С. Втрати часу руху поїздів на ділянках обмеження швидкості. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2007. Вип. 18. С. 54–61.

3. Баланов В. О. Аналіз факторів, які впливають на забезпечення руху вантажних поїздів за розкладом. *Транспортні системи та технології перевезень*: зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. 2015. Вип. 10. С. 5–9.
4. Резерви часу при організації руху вантажних поїздів за розкладом / Д. М. Козаченко, М. І. Березовий, В. О. Баланов, В. В. Журавель. *Експлуатація та ремонт засобів транспорту. Наука та прогрес транспорту*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. 2015. № 2 (56). С. 108.
5. Goverde R. M. P., Hansen I. A. Delay propagation and process management at railway stations. 5th World Conference on Railway Research (WCRR 2001): proceedings CD-ROM of the World Conference on Railway Research (WCRR 2001), Köln, November 25-29, 2001. Köln, 2001. P. 1-10.
6. Goverde R. M. P. A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2010. Vol. 18, No 3. P. 269-287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.01.002> (last access: 01.10.2020).
7. Бобровський В. І., Коробйова Р. Г., Баланов В. О. Імітаційна модель для оцінки пропускної здатності залізниць. *Наука та прогрес транспорту*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. 2018. №6 (78). С. 16–27.
8. Марценюк В. П., Цяпа Н. В. SIR-моделювання епідемії гострих респіраторних захворювань. *Медицина інформатика та інженерія / Тернопільський державний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського*. Тернопіль, 2009. № 4. С. 65-69.
9. Янчевская Е. Ю., Меснянкина О. А. Математическое моделирование и прогнозирование в эпидемиологии инфекционных заболеваний. *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Медицина. 2019. № 3 (23). С. 328–334. URL: <https://doi.org/10.22363/2313-0245-2019-23-3-328-334> (дата обращения 01.10.20).
10. Стрельченко І. Проблеми та перспективи моделювання лавиноподібних процесів усередині систем фінансових інститутів. *Економічний аналіз*. Київ. 2013. Вип. 12. С. 329–332.
11. Zeng Z., Li T. Analyzing Congestion Propagation on Urban Rail Transit Oversaturated Conditions: A Framework Based on SIR Epidemic Model. *Urban Rail Transit*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/s40864-018-0084-6> (last access: 01.10.2020).
12. Development of a method for studying the impact of the time reserve value on the reliability of the train schedule based on the epidemiological SIR model / S. Panchenko, A. Prokhorchenko, O. Dekarchuk, D. Gurin, D. Mkrtychian, V. Matsiuk. *Journal IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1002 012016. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1002/1/012016> (last access: 01.10.2020).
13. Інструкція зі складання графіка руху поїздів на залізницях України: ЦД-0040. Затв. Укрзалізницею 05.04.2002. Вид. офіц. Київ: Транспорт України. 2002. 164 с.
14. *Differential Equations with Matlab (3rd Edition)* / B. R. Hunt, R. L. Lipsman, J. E. Osborn, J. M. Rosenberg. 2019. 304 p.

Проходченко Андрій Володимирович, д-р техн. наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 0666357601.

E-mail: prokhorchenko@kart.edu.ua.

Гурін Дмитро Олегович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-88. E-mail: dmitriy.gurin1990@gmail.com.

Лагута Ірина Олегівна, магістрант, група 221-ОПУТ-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 0505317237. E-mail: irinalaguta8@gmail.com.

Суницька Вікторія Олександрівна, магістрант, група 221-ОПУТ-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (095)7245759. E-mail: sunitskayav@gmail.com.

Prokhorchenko Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Railway Operation and Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 0666357601. E-mail: prokhorchenko@kart.edu.ua.

Gurin Dmytro, postgraduate student, department of Railway Operation and Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-88. E-mail: dmitriy.gurin1990@gmail.com.

Lahuta Iryna, master, Group 221-OPUT-D19, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 0505317237. E-mail: irinalaguta8@gmail.com.

Sunytska Viktoriia, master group 221-OPUT-D19 Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (095)7245759. E-mail: sunitskayav@gmail.com.

Статтю прийнято 03.11.2020 р.

УДК 656.223

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ НА СТАДІЇ ПЛАНУВАННЯ ЗМІШАНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотко, магістрант Д. Д. Ковальов

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS AT THE PLANNING STAGE OF INTERNATIONAL INTERMODAL TRANSPORTATIONS

D. Sc. (Tech.) D. V. Lomotko, master D. D. Kovalov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229820>

Анотація. Потреби у переміщенні товарів завжди були ключовою складовою суспільства. Важко уявити сучасну країну без розвинених транспортних систем і технологій, саме тому протягом останніх десятиліть упроваджуються новітні комп'ютерні системи для задоволення потреб перевізників. Дослідження цього сегмента логістики показують, що складність технологічного процесу міжнародних змішаних перевезень завдає певних проблем усім учасникам транспортування. Стаття описує використання програмного забезпечення на базі генетичних алгоритмів для врегулювання та покращення використання комерційних умов – Інкотермс 2020. Беручи до уваги усі недоліки існуючих програмних засобів, запропоновано використання евристичного підходу для пошуку оптимального варіанта перевезень та автоматизації процесу планування.

Ключові слова: інтермодальні перевезення, генетичні алгоритми, Інкотермс, оптимальний маршрут, митні процедури, евристичні методи.

Abstract. The necessity to transport goods has always been a crucial component of every society. It is difficult to imagine a modern country without an advanced transport network and technology, which is why the latest computer systems have been developed over the past decades to meet the needs of carriers. The study of this logistics segment shows that the complexity of the technological process of international intermodal transportation causes a range of problems to all parties involved in transportation. An advanced transport network provides a large number of possible options for the transportation of goods or commodities. That is why the computerization of the planning process is the next step in the evolution of transport logistics. This article describes the usage of software based on genetic algorithms to settle and improve the use of commercial Incoterms

2020. Taking into account all the limitations of existing software, it is proposed to use a heuristic approach to find the optimum transportation option and automate the planning process. Ukraine has always assigned a priority role to the railway mode of transport. This is why the railway industry has always been an integral part of the multimodal transportation process. Analysis of imports and exports shows stable growth over the past ten year period. Additionally, Ukraine enjoys a very advantageous geographical location, in that four important transport corridors cross the territory of our country. Studies indicate that innovations in this area will positively contribute to the credibility of Ukrainian carriers. Further, the article describes the typical problems that arise during the usage of the basic Incoterms terms of delivery, including the complexity of customs procedures and clearance of goods, as well as unforeseen monetary costs arising from the difference in the laws of the countries participating in the transportation process. The author proposes the automation of the transportation planning process as a key to solving these disadvantages. The proposed innovation does not require significant investment and can create positive economic value by substantially reducing the cost of transportation.

Keywords: intermodal transportation, genetic algorithms, Incoterms, optimal route, customs procedures, heuristic methods.

Вступ. Географічне розташування України сприятливо впливає на розвиток торгово-економічних відносин з країнами світу. З погляду транспортної логістики Україна відводить пріоритетну роль саме залізничному виду транспорту. Саме тому залізнична галузь є невід'ємною складовою перевізного процесу у змішаному сполученні. Труднощі виникають не лише через велику кількість можливих варіантів одного і того самого перевезення, а й через складність митних процедур. Незважаючи на те що у 1936 році Міжнародна торговельна палата представила перші правила Інкотермс, стадія планування перевезення досі передбачає високу вірогідність помилки, що викликає непередбачені витрати і знижує прибуток учасників транспортування. Дослідження стверджують, що більшість помилок виникає саме через людський фактор або брак достатньої кількості інформації. Отже, автоматизація процесу планування виступає наступним кроком у розвитку транспортної логістики.

Проаналізувавши математичні моделі та методи, які використовують сучасні програмні забезпечення, можна дійти висновку, що лідерами є евристичні підходи до вирішення задач оптимізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впровадження автоматизованих систем потребує застосування наукового підходу та докладного аналізу існуючих моделей. Існують два типи програм, які виконують оптимізаційну функцію, спираючись на точні та евристичні методи. Обидва застосовувались для вирішення задач оптимізації маршрутів прямування залежно від обраного основного критерію. Наприклад, для пасажирських перевезень закордонні онлайн-сервіси пропонують розрахунок вартості заданого маршруту. Однак існують певні проблеми, які не враховуються у вищезгаданих ресурсах:

- не було запропоновано «онлайн-калькулятора» для інтермодальних вантажних перевезень;
- більшість із сервісів пропонують оптимальний варіант, спираючись лише на один обраний критерій;
- не беруться до уваги юридичні особливості країн експорту або імпорту;
- не пропонуються можливі варіанти застосування термінів Інкотермс;
- достовірність даних.

Усі зазначені недоліки впливають на кінцевий результат і можуть погіршити кінцеві економічні, технічні та технологічні показники транспортування.

Вивченням і впровадженням генетичних алгоритмів займалися такі науковці, як Бутько Т. В., Прохоров В. М., Фейгін В. С., Журавльов С. Ю., Кондратьєва А. В. та ін. Журавльов і Фейгін розглядають використання генетичних алгоритмів для зменшення енерговитрат при застосуванні машинно-тракторних агрегатів [17]. Була запропонована модель на основі генетичних алгоритмів для автоматизації оперативної роботи на сортувальних станціях [12]. Також генетичні алгоритми використовувалися для пошуку оптимального рішення задачі комівояжера [18].

Визначення мети та завдання дослідження. Основна мета дослідження полягає в аналізі комп'ютерних моделей у плануванні інтермодального перевезення при використанні базисних умов поставок Інкотермс. Для досягнення поставленої мети потрібно:

- дослідити схожі існуючі моделі та методи;
- проаналізувати переваги та недоліки правил Інкотермс 2020;
- описати та проаналізувати модель на наочному прикладі.

Основна частина дослідження. Інтермодальне перевезення – послідовне перевезення вантажів двома або декількома видами транспорту в одній і тій самій інтермодальній/комбінованій транспортній одиниці без перевантаження самого вантажу при зміні виду транспорту. Його організатор на всіх етапах розробки і здійснення перевізного процесу цілеспрямовано погоджує дії всіх сторін, що беруть участь у ньому – вантажовласників, перевізників і перевізних комплексів – в інтересах прискорення перевезення товарів і зниження сукупних витрат на їхнє перевезення.

На сьогоднішній день існує тенденція до систематизації змішаних перевезень. Усі методи планування поставленого завдання можна умовно поділити на дві групи: точні

та евристичні методи. Точні методи гарантовано знаходять, маючи достатньо часу, оптимальний шлях. Евристичні методи знаходять, часто за значно коротший час, гарні розв'язки, що, в загальному випадку, можуть бути гіршими за оптимальні. Розвинена транспортна система передбачає велику кількість можливих варіантів одного і того самого перевезення. Потрібно мати на увазі величезну кількість різних складових перевезень, враховувати та раціонально розподіляти ризики між усіма учасниками транспортування. При великих обсягах даних широкого застосування набувають евристичні методи пошуку оптимуму цільової функції. Одними з найбільш прогресивних є генетичні алгоритми, які дають змогу знаходити кращі результати за дуже короткий час і з мінімальними матеріальними та людськими ресурсами на планування транспортування.

З метою спрощення транспортних відносин були створені міжнародні комерційні умови, комплект міжнародних правил з тлумачення найбільш широко використовуваних торговельних умов – Інкотермс (англ. Incoterms). На сьогоднішній день Інкотермс 2020 налічує 11 різних термінів, які широко використовуються в галузі міжнародної торгівлі. Всі поділені на чотири різні групи (E, F, C, D), кожен з них описує конкретний варіант транспортування і умови переходу відповідальності і ризиків від однієї сторони до іншої.

При плануванні перевезення доцільно розподілити його на відповідні етапи транспортування, як це показано на схемі (рис. 1). Це спрощує процес розрахунків і показує, в який саме момент часу обов'язки та ризики переходять до іншої сторони. Особливої уваги потребують ключові відмінності між термінами, акцентовано увагу на проблемних моментах кожного з варіантів та виділено переваги і недоліки кожного з них.

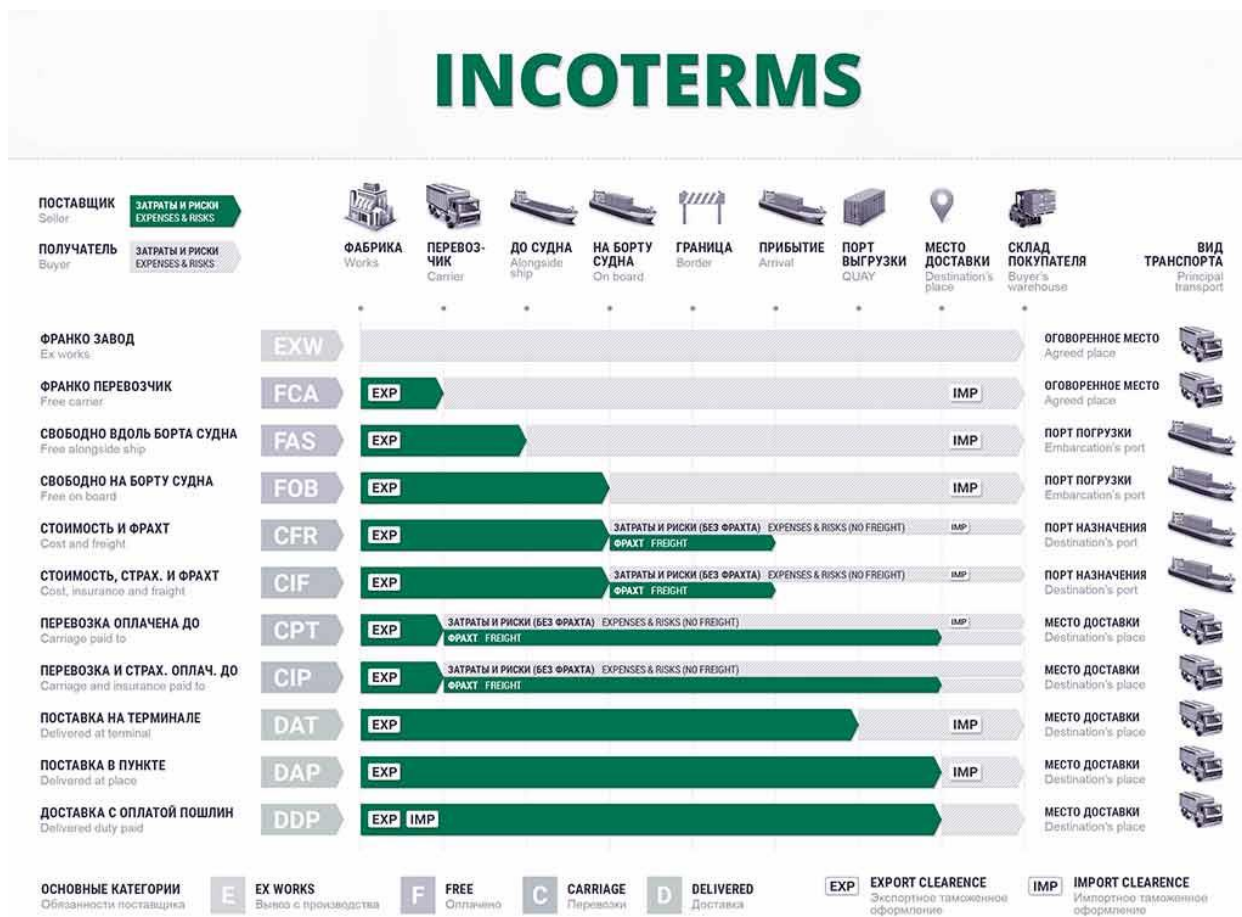


Рис. 1. Порядок здійснення транспортних операцій та розподіл обов'язків між сторонами згідно з правилами Інкотермс 2020

При міжнародному перевезенні велика увага приділяється митним процедурам та нормативно-правовій базі надання послуги. Оскільки закордонний досвід і технологія транспортування може відрізнятися від українських, будуть різнитися як ціна послуги, так і час на перевезення і всі супутні йому операції. Саме тому автоматизація процесу планування може значною мірою покращити кінцеві результати. Метод генетичних алгоритмів надасть змогу проаналізувати існуючих перевізників та кон'юнктуру ринку і залежно від пріоритетного критерію запропонувати оптимальний для кожної сторони варіант. Також докладний опис показує, що більшість помилок виникає саме через людську неуважність.

Стосовно генетичних алгоритмів – за принципом роботи вони нагадують процес еволюції Дарвіна. «Еволюція», як правило, починається з популяції випадково згенерованих особин і є ітераційним процесом, причому популяція в кожному циклі називається поколінням. У кожному поколінні оцінюється придатність кожної особи у популяції; придатність зазвичай являє собою значення цільової функції в задачі оптимізації, яка вирішується. Також слід наголосити на тому, що деякі параметри алгоритму потрібно задавати користувачу. Конкретно для завдання оптимізації перевезень потрібно враховувати маршрутну швидкість транспортного засобу, якість та завантаженість маршрутів, особливості

перевезення, потреби клієнтів, інформацію про вантаж, що надається до транспортування, тощо. Тому вводяться додаткові константні або змінні величини. Маючи ці дані, будується граф з відповідними показниками (наочне відображення шляху). Для підвищення швидкості отримання результату шляхи, які заздалегідь не використовуватимуться, доцільно ліквідувати з розрахунків.

У нашому дослідженні існують декілька критеріїв, за якими обиратиметься кінцеве рішення. Отже, буде створюватися декілька масивів даних, по одному для кожного з критеріїв. Транспортна логістика зазвичай вирішує проблеми швидкості доставки вантажу, витрат на перевезення та безпеки транспортування. Для задоволення усіх потреб необхідно запропонувати декілька найкращих варіантів, але кінцеве рішення залишається за людиною. Виконання розрахунків слід відокремити одне від одного для уникнення конкуренції даних між собою.

Цільова функція вартості доставки

$$ЗС = MB + \sum C_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

де ЗС – загальна вартість перевезення; C_i – собівартість перевезення i -го виду транспорту; MB – митна вартість.

Як було зазначено вище, митні витрати відіграють критичну роль при виборі базисних умов. Існує декілька різних способів розрахунку митних витрат. Для

нашої роботи ми скористалися способом на основі додавання вартості. Оцінка митної вартості здійснюється шляхом складання різних видів витрат і прибутку експортера.

Митна вартість на основі додавання

$$MB = VB + VD + NP + VP + LP + CP, \quad (2)$$

де VB – вартість матеріалів і витрат, яких зазнав виробник у зв'язку з виробництвом оцінюваних товарів; VD – витрати в Україні на вантаження, розвантаження, транспортування і страхування; NP – прибуток, що отримує експортер; VP – витрати покупця; LP – ліцензійні та інші платежі за використання об'єктів інтелектуальної власності, які покупець повинен здійснити як умову експорту товару, що оцінюється; CP – відповідна частина прибутку від подальшого перепродажу товарів, що накопичуються у продавця.

Цільова функція часу доставки

$$T_{\text{дост}} = T_p + T_{п-к} + T_{п} + T_{б} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де T_p – час руху; $T_{п-к}$ – час на початково-кінцеві операції; $T_{п}$ – час на простої; $T_{б}$ – буферний час.

Вираз $f(H_j) \rightarrow \min, j = 1, 2, 3 \dots N$ показує, що проводиться операція мінімізації даних. Обираються лише ті індивіди, які містять у собі менші значення. З точки зору математики вони мають такий вигляд:

$$\text{fitness}_k = \begin{cases} \frac{I^{\max} - f(x_k)}{I^{\max} - I^{\min}}, & \text{якщо } I^{\max} \neq I^{\min} \\ 1, & \text{якщо } I^{\max} = I^{\min} \end{cases}, \quad (4)$$

$$I^{\min} = \min_{x \in Y} f(x),$$

$$I^{\max} = \max_{x \in Y} f(x),$$

де I – безліч представлених індивідами значень цільової функції в поточному поколінні; x – фенотип; $f(x_k)$ – значення цільової функції; k – номер фенотипу.

Порядок виконання операцій у генетичному алгоритмі подано на схемі (рис. 2):

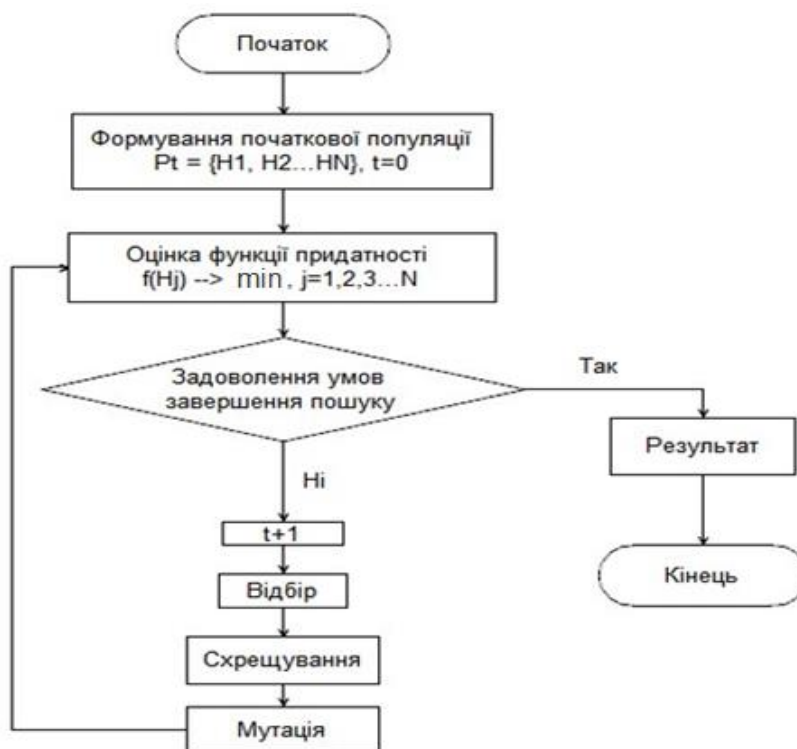


Рис. 2. Процедура виконання генетичного алгоритму

Кожна стохастична модель повинна мати обмеження цільової функції. У нашому випадку такими обмеженнями слугуватимуть дані, які вводяться людиною. Оскільки немає певної сталої величини, яка б обмежувала вартість і час на перевезення, потрібно заносити ці величини до алгоритму кожного разу. Так, наприклад, перша сторона встановлює максимальний час на перевезення, який алгоритм не має права перевищувати. Таким чином ми виключаємо більшість варіантів, які заздалегідь не відповідають умовам перевезення та вимогам клієнтів. Те саме стосується і вартості доставки. Учасники перевезення мають становити певний грошовий максимум, за межами якого пошук оптимального рішення не проводиться.

Висновки. Ринкова економіка та зростання обсягів міжнародної торгівлі спонукають перевізників до покращення і

раціоналізації планування перевезення. Комп'ютеризація цього процесу надасть можливість:

- 1) значно скоротити час на пошук оптимальних рішень виходячи з критеріїв часу та вартості;
- 2) зменшити ризики та вірогідність виникнення помилок;
- 3) враховувати нормативно-правову базу країн імпортерів/експортерів.

Створення автоматизованих систем позитивно впливатиме на транспортно-логістичну галузь у нашій країні. Україна матиме чудовий шанс на покращення перевізних послуг і створить сприятливі умови для підвищення іміджу країни в очах закордонних клієнтів. Запропонована інновація не потребує значних капіталовкладень і може створити позитивний економічний ефект за рахунок зменшення собівартості від впровадження технології.

Список використаних джерел

1. Incoterms 2020 – значение термина. URL: https://www.alt.ru/information/glossarium/инкотермс_2020_incoterms_2020/ (дата звернення: 03.10.2020).
2. Инкотермс 2020, изменения в условиях поставок. URL: <https://anvay.ru/incoterms-2020> (дата звернення: 03.10.2020).
3. Инкотермс. Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Инкотермс> (дата звернення: 03.10.2020).
4. ICC INTERNATIONAL CHAMBER OF COMMERCE. URL: <https://iccwbo.org/resources-for-business/incoterms-rules/incoterms-2020/> (дата звернення: 03.10.2020).
5. Баланов В. О. Огляд раціональних шляхів розвитку залізничних перевезень міжнародними транспортними коридорами. *Транспортні системи та технології перевезень: Зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2013. Вип. 5. С. 5-11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2013_5_2. (дата звернення: 03.10.2020).
6. Дейнека О. Г., Реброва А. Ю. Визначення чинників впливу на рівень конкурентоздатності залізничного транспорту на міжнародному ринку транзитних перевезень. *Проблеми економіки транспорту: зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2011. Вип. 1. С. 40-43. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnuzt_pet_2011_1_8. (дата звернення: 03.10.2020).
7. Intermodal savings calculator. URL: <https://www.louplogistics.com/resource-center/intermodal-savings-calculator.html> (дата звернення: 03.10.2020).
8. Угода між Кабінетом Міністрів України та Урядом Турецької Республіки про міжнародні комбіновані перевезення від 04.10.2017. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/792_001-16#Text (дата звернення: 03.10.2020).
9. Вовк В. М., Нефьодова Ю. М. Особливості формування собівартості вантажних перевезень транспортом перевізників за базисних умов поставок Інкотермс. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки*. 2016. Вип. 1. С. 28-35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnuvgr_ekon_2016_1_6. (дата звернення: 03.10.2020).
10. Сорокіна С. В., Маслов А. А., Шкурко Є. Л. Особливості застосування правил Інкотермс 2010 у митній справі. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2012. Вип. 1. С. 539-547. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2012_1_86. (дата звернення: 03.10.2020).
11. Грущинська Н. М., Антоненко К. В. Інкотермс як головний документ регулювання базисних умов поставки при управлінні експортно-імпортними операціями підприємства України з урахуванням європейських стандартів. *Вісник Академії митної служби України. Серія: Економіка*. 2009. № 1. С. 93-100. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vamsue_2009_1_16. (дата звернення: 03.10.2020).
12. Бутько Т. В., Прохоров В. М., Чехунов Д. М. Технологія інтелектуального управління сортувальною станцією на основі багаточільової оптимізації з використанням генетичних алгоритмів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 4. С. 45-55. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/4484> (дата звернення: 03.10.2020).
13. Себестоимость перевозки груза. URL: <https://studfile.net/preview/5877367/page:29/> (дата звернення: 03.10.2020).
14. Методи визначення митної вартості товару. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Методи_визначення_митної_вартості_товару (дата звернення: 18.12.2020).

15. Расчет времени и скорости доставки грузов. URL: <http://www.transpobrand.ru/tabras-823-1.html> (дата звернення: 03.10.2020).

16. Генетичний алгоритм. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Генетичний_алгоритм (дата звернення: 03.10.2020).

17. Журавлев С. Ю., Фейгин В. С. Генетический алгоритм решения многокритериальной задачи оптимизации энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2013. С. 182-191. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geneticheskiy-algoritm-resheniya-mnogokriterialnoy-zadachi-optimizatsii-energozatrata-pri-ispolzovanii-mashinno-traktornykh-agregatov/viewer> (дата звернення: 03.10.2020).

18. Кондратьева А. В. Построение оптимального маршрута и его визуализация с помощью WebGL. Руководитель дипл. работы А. В. Уланов. Санкт-Петербургский нац. ун-т. 2016. URL: <https://dspase.spbu.ru>.

Ломотко Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7624-2925. Тел.: +38 (057) 730-19-55. E-mail: den@kart.edu.ua.

Ковальов Денис Дмитрович, магістрант, група 11-Пм-ОПУТ-мд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (098) 408-83-03. E-mail: dkovalov123@gmail.com.

Lomotko Denis, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Transport Systems and Logistics at Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7624-2925. Tel.: +38 (057) 730-19-55. E-mail: den@kart.edu.ua.

Kovalov Denis, master, Group 11-Pm-OPUT-md, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (098) 408-83-03. E-mail: dkovalov123@gmail.com.

Статтю прийнято 06.11.2020 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.4.027.5

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ОСІ КОЛІСНОЇ ПАРИ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, кандидати техн. наук А. В. Труфанова, В. М. Петухов, В. О. Шовкун

ANALYSIS OF THE STRESSED STATE OF THE AXLE OF A WHEEL PAIR OF A PASSENGER CAR

D. Sc. (Tech.) I. E. Martynov, PhD (Tech.) A. V. Trufanova, PhD (Tech.) V. M. Petukhov, PhD (Tech.) V. O. Shovkun

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229826>

Анотація. У статті розглянуто результати розрахунків осі колісної пари пасажирського вагона на міцність та довговічність від втоми. Визначено навантаження, що діють на вісь пасажирського вагона під час руху з максимально допустимою швидкістю.

Розроблено розрахункову модель вагонної осі РУ1, на підставі якої створено скінченно-елементну модель і досліджено напружений стан колісної пари під дією основних видів навантаження. Встановлено, що максимальні напруження, що виникають в осі пасажирського вагона за найбільш несприятливих умов завантаження, зосереджені у галтелі в зоні переходу від шийки до передпідматочинної частини осі.

Виконано розрахунок осі на втому. Визначено кількість циклів навантажень, яку вагонна вісь може витримати при експлуатаційних навантаженнях. За результатами проведених досліджень запропоновані обмеження на строк експлуатації осей колісних пар пасажирських вагонів.

Ключові слова: пасажирський вагон, вагонна вісь, відмова, розрахункова модель, міцність, напруження, втома.

Abstract. The paper considers the results of calculations of the axle of the wheel pair of a passenger car for strength and durability from fatigue. The loads acting on the axle of a passenger car during movement at the maximum permissible speed are determined.

To solve the problems of studying the stress state of the axle of the passenger car at the first stage, a three-dimensional geometric model of the axis RU1 was developed. The most unfavorable load combination was taken into account in the calculation. The horizontal load was up to 10 kN. The load was applied to the axle necks, respectively, in the vertical and horizontal directions.

The calculated model of the car axle RU1 is developed, on the basis of which the finite-element model is created and the stress state of the wheel pair under the action of the main types of load is investigated. The size of the finite element grid was chosen using a graphoanalytical method and refined to a size of 2 mm. This feature of the finite element grid allowed to calculate the stresses in the calculated cross sections with greater accuracy and to determine the nature of the stress distribution. It is established that the maximum stresses arising in the axle of the passenger car under the most unfavorable work conditions that are concentrated in the filler in the zone of transition from the neck to the pre-axle part.

The axle was calculated for fatigue. Fatigue tests are usually performed at a uniaxial stress state, so it is necessary to convert the multiaxial stress state to one scalar value to determine the number of cycles to failure at a given voltage amplitude. The load can occur with a constant amplitude. The number of load cycles that the car axle can withstand under operating loads is determined. According to the results of the research, restrictions on the service life of the axles of wheel pairs of passenger cars are proposed.

Keywords: *passenger car, car axle, failure, design model, strength, stress, fatigue.*

Вступ. Безпека руху на залізничному транспорті забезпечується як надійною роботою технічних засобів, так і багаторівневою системою ремонту та технічного обслуговування, яка спрямована на підтримання технічних засобів у працездатному стані.

Повною мірою це стосується нетягового рухомого складу. Але, розглядаючи вагон як технічно складну систему, необхідно виділити в його конструкції елементи, які мають критичне значення для забезпечення надійності. В першу чергу це стосується ходових частин і особливо колісних пар, на які при русі по рейковій колії діють різноманітні статичні та динамічні навантаження. Тому колісну пару можна розглядати як найбільш відповідальний вузол, складові елементи якого – вісь і колеса, навантажені найбільш інтенсивно. Тобто залізничні осі є критично важливими елементами безпеки, розрахованими на тривалу експлуатацію. Оцінка напруженого стану осі та оцінка строку її служби є важливою частиною досліджень у галузі проектування і обслуговування залізничних осей. При цьому на вісь колісної пари під час експлуатації впливає складний вид навантаження – вигин з обертанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні вимоги до міцності та надійності колісних пар вітчизняних пасажирських вагонів визначено у чинному нормативному документі [1]. Базові положення розрахунку колісних пар викладено у навчальному посібнику [2]. Автори розглядають основні навантаження, що виникають при русі вагона. При цьому найбільш навантаженою в цьому випадку є,

як правило, перша за напрямком руху колісна пара. Це обумовлено тим, що при вписуванні рухомого складу в криві ділянки колії в поєднанні з вертикальним статичним і динамічним навантаженнями на колісну пару діє напрямна сила рейки.

У статті [3] авторами розроблено методику порівняльної оцінки на міцність осей колісних пар диференціального і типового виконання. Проведено кількісну оцінку осей колісних пар диференціального і типового виконання для випадку руху чотиривісного вагона.

Аналогічний підхід діє в країнах Європейського Союзу. Проектування та розрахунок вагонних осей регламентується відповідними стандартами [4, 5]. Вважається, що до деформації вигину осі призводять дві групи навантажень; вертикальні та горизонтальні. Щодо згинальних моментів, то згинальні напруження в усіх поперечних перерізах осі розраховуються з урахуванням типу осі. Розрахункове напруження має не перевищувати допустимого напруження, яке визначається як межа витривалості осі, поділена на коефіцієнт безпеки.

У статтях [6] і [7] висвітлюються вимоги щодо механічних властивостей матеріалу осей і містяться вимоги щодо перевірки міцності на втому.

У дослідженні [8] наведено результати стендових випробувань осей вагонів типів РУ1 і РУ1Ш колісних пар вантажних вагонів, у яких методом плазмово-дугової металізації були відновлені шийки та підматочинні частини. Доведено, що середній строк експлуатації осей вантажних вагонів після відновлення складатиме 15 років.

Проведені випробування показали [9], що критично важливими частинами осі є посадочне місце маточини колеса і галтель у зоні переходу від підматочинної частини до шийки осі. Також було зазначено, що реальна критична точка залежить від співвідношення діаметрів різних частин осі, а більша частина пошкоджень осі виникає в результаті дії зовнішніх сил або корозії. Дослідження концентрацій напружень у виїмках і канавках залізничних осей підтверджує сумісність вимог стандарту EN 13104:2009 з результатами чисельного структурного аналізу і дає змогу отримати краще розуміння розмірів переходів на залізничних осях.

Для визначення механізму розвитку пошкодження від втоми в статті [10] подано теоретичну модель розвитку пошкоджень матеріалів від втоми з розрахунком величини пошкодження. Аналізуючи причини руйнувань залізничних осей, автор у дослідженні [11] з метою вдосконалення технології виготовлення осей запропонував метод визначення втомної довговічності. В роботі [12] для моделювання і прогнозування строку служби осі з урахуванням втоми використовували для експериментальних досліджень дефектну вісь. Авторами статті [13] запропоновано інтегровану модель розрахунку, засновану на комп'ютерному динамічному моделюванні. У дослідженні використана модель скінчених елементів рами візка, що складається з елементів

оболонки та балочних елементів, для отримання розподілу напружень та основних історій напружень у критичних зонах при динамічних навантаженнях як первинної, так і вторинної підвісок. Проаналізовано критичні зони у візку.

Результати аналізу напружень для різних конструкцій осей вантажних залізниць США наведено в [14]. На підставі порівняння різних методів аналізу напруженості осі, враховуючи критерії навантаження для різних осей, автори запропонували удосконалений метод аналізу напруженості осей, який був прийнятий північноамериканською галуззю вантажних залізниць для нових конструкцій осей, особливо для тих, що будуть використовуватися при підвищених навантаженнях на них.

Визначення мети та завдання дослідження. Останніми роками постачання нових вагонних осей суттєво зменшилося. Тому вкрай необхідно за допомогою сучасних математичних методів дослідити напружено-деформований стан осей пасажирських вагонів з урахуванням умов завантаження та визначити граничні строки експлуатації.

Основна частина дослідження. Розглянемо розрахунок основних показників завантаженості колісної пари пасажирського вагона на прикладі вагона моделі 61-779. Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці.

Таблиця

Вихідні дані для розрахунку вагонної осі

Показник	Величина
1	2
вага вагона порожнього (розрахункова) Q_B , кН	618
вага вагона з пасажирями $Q_{B.п.}$, кН	660
вага кузова порожнього Q_K , кН	476
висота центра ваги порожнього кузова від рівня головок рейок (РГР) h_K , м	2,163
вага кузова з пасажирями $Q_{B.п.}$, кН	518
висота центра ваги кузова з пасажирями від РГР $h_{K.п.}$, м	2,119
довжина вагона за осями зчеплення автозчепів $2L_C$, м	26,696

Продовження таблиці

1	2
висота автозчепу над РГР h_a , м	1,06
відстань між кругами кочення коліс $2S$, м	1,58
швидкість руху вагона V , км/год (м/с)	160 (44,44)
вага надресорної балки Q_6 , кН	6
вага пружин центрального ресорного підвішування візка Q_1 , кН	0,307
вертикальна жорсткість центрального ресорного підвішування візка C_{B1} , кН/м	2659,22
вага рами візка $Q_{p.t.}$, кН	14,68
вага пружин буксового ресорного підвішування візка Q_2 , кН	0,312
вертикальна жорсткість буксового ресорного підвішування одного візка C_{B2} , кН/м	6567,064
вага котлового / некотлового візка Q_{T1}/Q_{T2} , кН	74,0/68,0
висота центра ваги візка від РГР $h_{ц.т.}$, м	0,6
бічна проекція кузова S_k , м ²	98
висота центра ваги бокової проекції кузова від РГР $h_{в.к.}$, м	2,7
бічна проекція візка S_t , м ²	6,8
висота центра ваги бічної проекції візка від РГР $h_{в.т.}$, м	0,6
число осей вагона, n	4
відстань між центрами ресорних комплектів $2b_2$, м	2,036
висота від РГР до верхньої площини центрального ресорного комплексу у вільному стані h_p , м	0,609

Місця прикладання діючих сил – шийки осей, а реакції виникають на поверхні кочення колеса в місці контакту з рейкою.

Під час розрахунків урахувались такі навантаження [2]:

- вертикальне статичне навантаження;
- вертикальне динамічне навантаження;
- вертикальне навантаження, обумовлене дією бокових сил;
- вертикальне навантаження від дії сил інерції (додаткове завантаження першого по напрямку руху візка при гальмуванні).

Для вирішення завдань дослідження напруженого стану осі пасажирського вагона на першому етапі було розроблено тривимірну геометричну модель осі РУ1 (рис. 1).

Побудована модель повністю повторює реальну конструкцію осі, дає

зможу імітувати на неї вплив і характер дії різних ходових навантажень.

Розрахункову схему на осі подано на рис. 2.

Модель закріплювалась у вузлах кріплення підматочинної частини осі та навантажувалась вертикальними і горизонтальними зусиллями.

При розрахунку враховувалась найбільш несприятлива комбінація навантаження: на ліву шийку вертикальним навантаженням 109,73 кН та інерційним навантаженням 17,9 кН; на праву шийку: вертикальним навантаженням 57,45 кН та інерційним навантаженням 7,01 кН. Горизонтальне навантаження – до 10 кН. Навантаження прикладалися до шийок осі відповідно у вертикальному та горизонтальному напрямку.

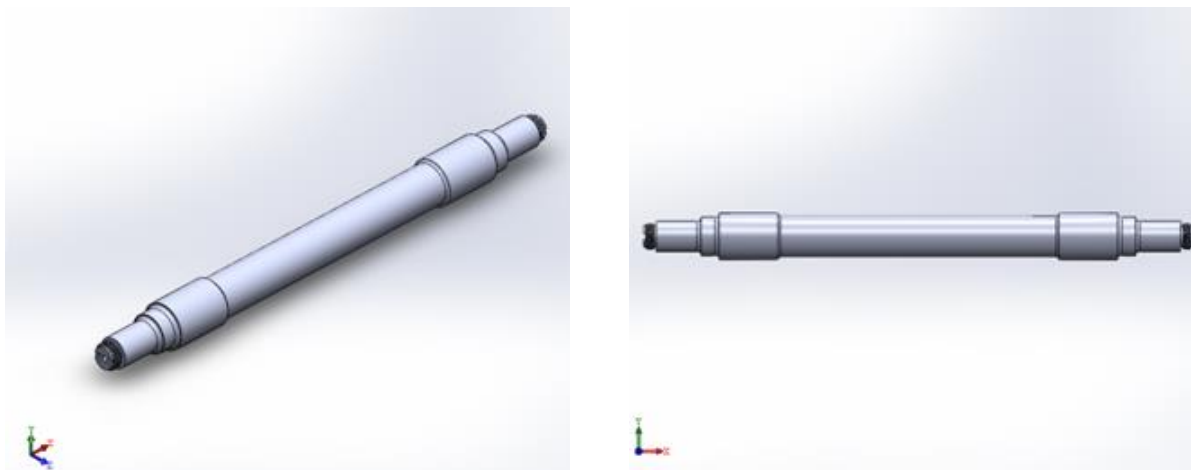


Рис. 1. Геометрична модель осі

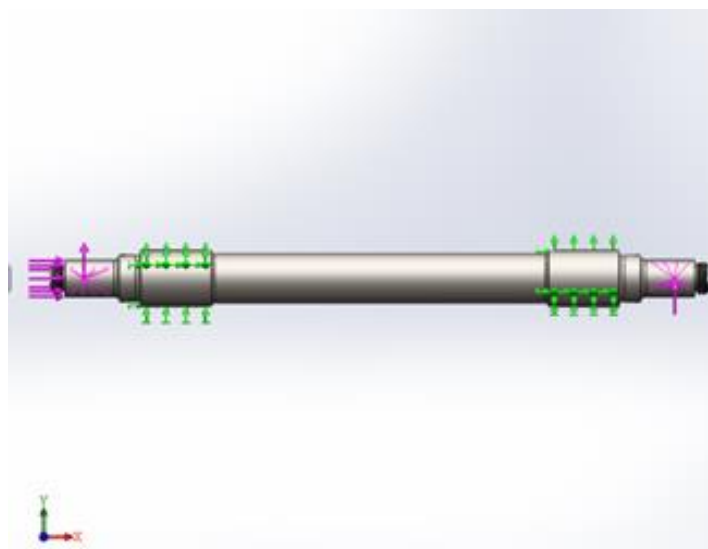


Рис. 2. Розрахункова схема осі

Для оцінки напружено-деформованого стану осі пасажирського вагона застосовувався пакет програм, заснований на методі скінченних елементів (МСЕ), який на сьогодні є одним з найпоширеніших методів вирішення прикладних завдань інженерної механіки. В основі методу лежить дискретизація об'єкта з метою розв'язання рівнянь механіки суцільного середовища в припущенні, що ці співвідношення виконуються в межах кожної з елементарних областей.

Розроблена скінченно-елементна модель складалася з 212753 скінченних елементів та 2130210 вузлів (рис. 3).

Для моделювання об'ємів твердих тіл використовувалися 10-вузлові скінченні елементи тетраедрального типу. Елемент визначається десятьма вузлами, що мають три ступені вільності в кожному вузлі: переміщення у напрямі осей X, Y, Z у системі координат вузла. Саме такі елементи найкраще підходять для моделювання машинобудівних конструкцій відносно малих розмірів, але складної форми.

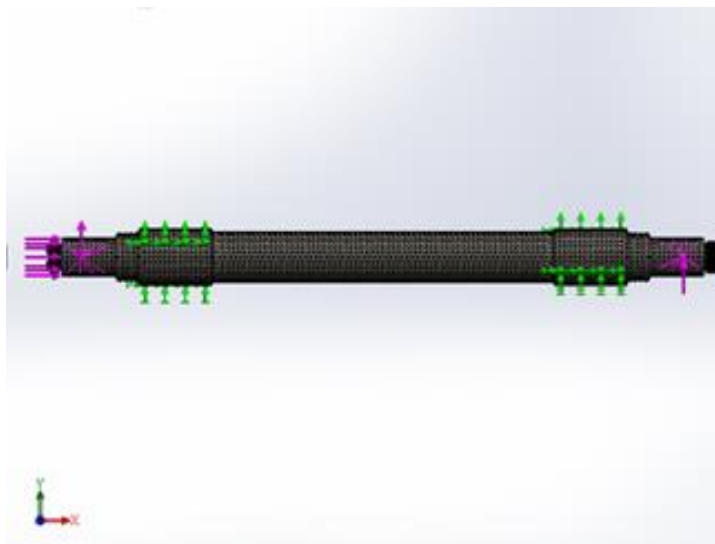


Рис. 3. Скінченно-елементна модель осі

Розмір сітки скінченних елементів обирався за допомогою графоаналітичного методу і уточнювався до розміру 2 мм. Така особливість скінченно-елементної сітки дозволила з більшою точністю обчислювати напруження у розрахункових перетинах та визначити характер розподілення напружень.

Навантаження моделі здійснювалося в площинах глобальної системи координат (OXYZ). Вісь закріплювалась за підматочинні частини (переміщення по осях Z і Y трьох степенів вільності прирівнювалися до 0, по осі X дозволялися для однієї зі сторін осі). Запропонована модель дозволяє імітувати різні варіанти навантаження з оцінкою напружено-деформованого стану осі.

Під час розрахунку моделі було прийнято такі припущення:

- вплив технологічних відхилень при виготовленні, а також їх можливе спрацювання в експлуатації не враховуються;

- матеріал осі: конструкційна вуглецева якісна сталь ОсВ;

- матеріал осі працює в пружній стадії деформації і має постійні характеристики – модуль пружності $E = 2,1 \times 10^5$ МПа і коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$.

Максимальні напруження, що виникають в осі пасажирського вагона за найбільш несприятливих умов завантаження, не перевищують 52 МПа, що задовольняє вимоги чинних нормативних документів [1] (рис. 4).

Напруження, що виникають у лівій частині осі, наведено на рис. 5.

Визначено, що конструкція вагонної осі з великим запасом міцності задовольняє вимоги чинних нормативних документів. Максимальні напруження, що виникають в осі пасажирського вагона за найбільш несприятливих умов завантаження, зосереджені у галтелі в зоні переходу від шийки до передпідматочинної частини осі і не перевищують 52 МПа. Це значно менше допустимих напружень для шийки осі пасажирського вагона.

Отримані результати дали можливість виконати розрахунки на міцність від втоми. У програмному комплексі на першому етапі проводиться статичне вирішення, а потім розрахунок втоми.

Аналіз утомної міцності виконується в модулі Mechanical після лінійного статичного вирішення. Обчислення у втомному модулі виконуються незалежно від обчислень аналізу напружено-деформованого стану.

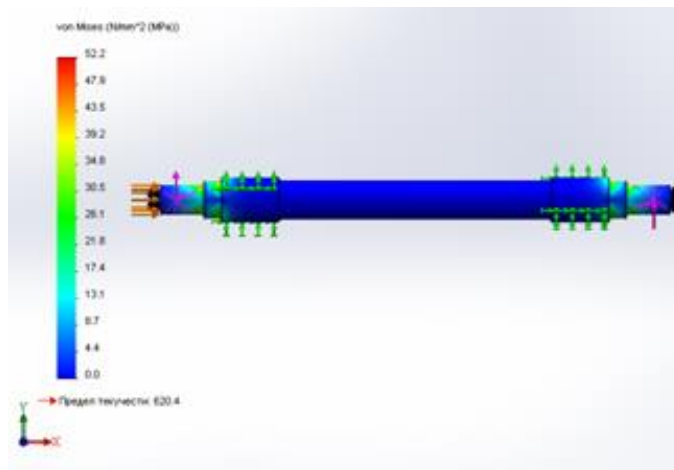


Рис. 4. Максимальні еквівалентні напруження

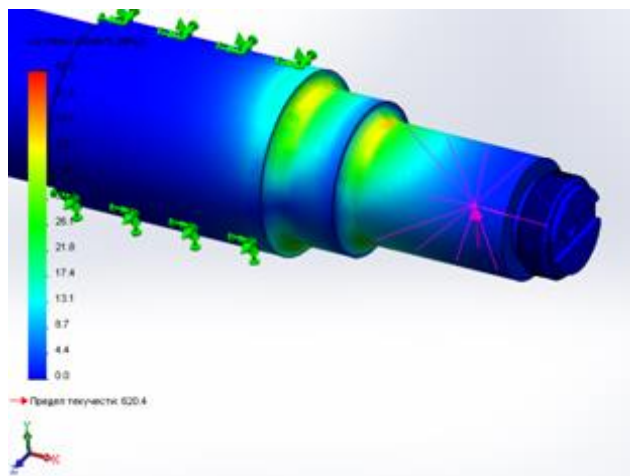


Рис. 5. Максимальні еквівалентні напруження, що виникають у зоні передпідматочинної частини осі

У статичному вирішенні вказуються параметри циклу, що з чим порівнювати, і всі дані щодо розрахунку втоми. У загальному випадку втома відноситься до циклічного навантаження або навантаження, що періодично повторюється, отримані результати ґрунтуються на лінійному статичному, але не гармонічному аналізі.

Незважаючи на те, що нелінійності можуть бути наявними в моделі, необхідно стежити за тим, щоб навантаження було пропорційним, оскільки втомний аналіз передбачає лінійну поведінку. Великі переміщення, нелінійні властивості

матеріалів перетворюють систему з лінійної на нелінійну. Тоді аналіз утомної міцності може бути вже помилковим:

- може бути заданий тип навантаження: «віднульовим», симетричним, а також із заданим коефіцієнтом асиметрії;
- також може бути введений масштабний коефіцієнт для масштабування всіх результуючих напружень.

При розрахунку осі колісної пари необхідна наявність середнього напруження. Ефект середнього напруження проявляється у збільшенні або зменшенні опору втомного руйнування.

Утомні випробування зазвичай проводять при одноосьовому напруженому стані, тому необхідно перетворення багатовісного напруженого стану до однієї скалярної величини для визначення числа циклів до руйнування при даній амплітуді напруження.

Навантаження може відбуватися з непостійною амплітудою. Якщо в цьому випадку зберігається пропорційність навантаження, то справедливий підхід – так званий «падаючий дощ» (RAIN FLOW). Даний метод розроблений для конвертації напружень, що змінюються нерівномірно, в цикли, які використовуються для втомних обчислень. Підраховуються цикли з різними середніми значеннями і різними

амплітудами, потім виконуються втомні обчислення.

Підсумовування пошкоджень осі колісної пари виконувалося за допомогою правила Полгрема–Майнера, при якому кожен цикл зі своїм середнім напруженням і амплітудою «витрачає» деяку частку доступної довговічності. При цьому якщо виконується рівність $\sum \frac{N_i}{N_{fi}} = 1$, відбувається руйнування конструкції.

Отже, будь-яка довільна історія навантаження може бути розбита на матрицю «стовпчиків» – кількість циклів з одним середнім значенням і розмахом напружень (рис. 6).

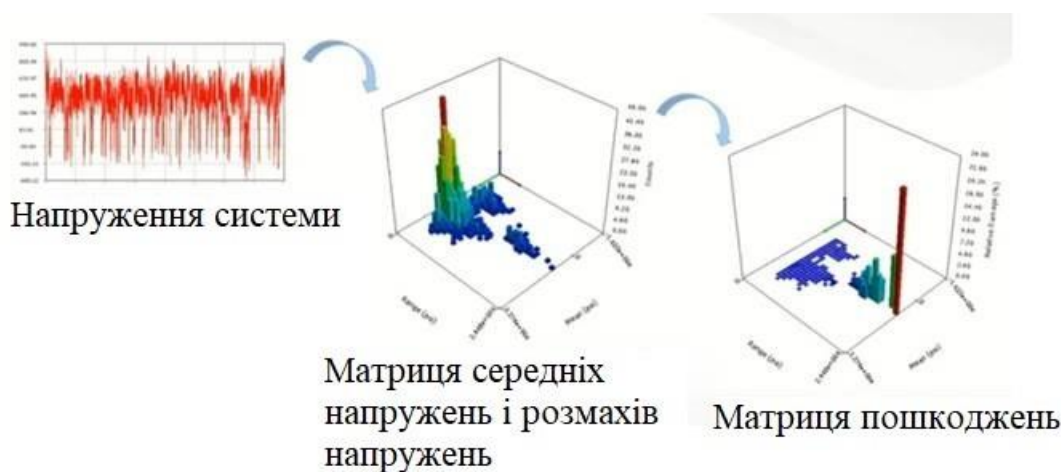


Рис. 6. Кількість циклів з одним середнім значенням і розмахом напружень

У матриці середніх напружень і розмахів напружень висота стовпчика – це кількість циклів, де по плоских горизонтальних осях зазначено середнє напруження циклу і амплітудне напруження. Іншими словами, чим вище стовпчик, тим більше таких циклів.

Крім того, існує можливість побудувати також матрицю напружень, з якої можна зрозуміти, який цикл витрачає більшу частку ресурсу надійності осі колісної пари.

Текстовий файл описує історію навантаження і має містити точки історії навантаження для одного хронологічного періоду.

Значення історії навантаження зберігається в текстовому файлі і є результатом статичного та динамічного навантажень, отриманих за результатами динамічного моделювання навантаження.

Для виконання втомних обчислень використовуються два набори навантажень. У цьому випадку у нас не відбудеться жодної комбінації рішення і стає можливим

розрахунок утомної міцності для несиметричного циклу навантаження.

Замість використання коефіцієнта асиметрії циклу, мінімальне і максимальне значення напружень визначалися з напружень, отриманих з двох випадків навантаження.

Оскільки залежність напружень в осі колісної пари від деформації нелінійна через особливості виготовлення і зміцнення, вісь

колісної пари за міцнішими характеристиками довговічності переходить до третьої області графіка кривої витривалості, а саме до області «необмеженої довговічності».

У результаті розрахунків отримано епюри втомної довговічності осі колісної пари пасажирського вагона. Вони зображені на рис. 7.

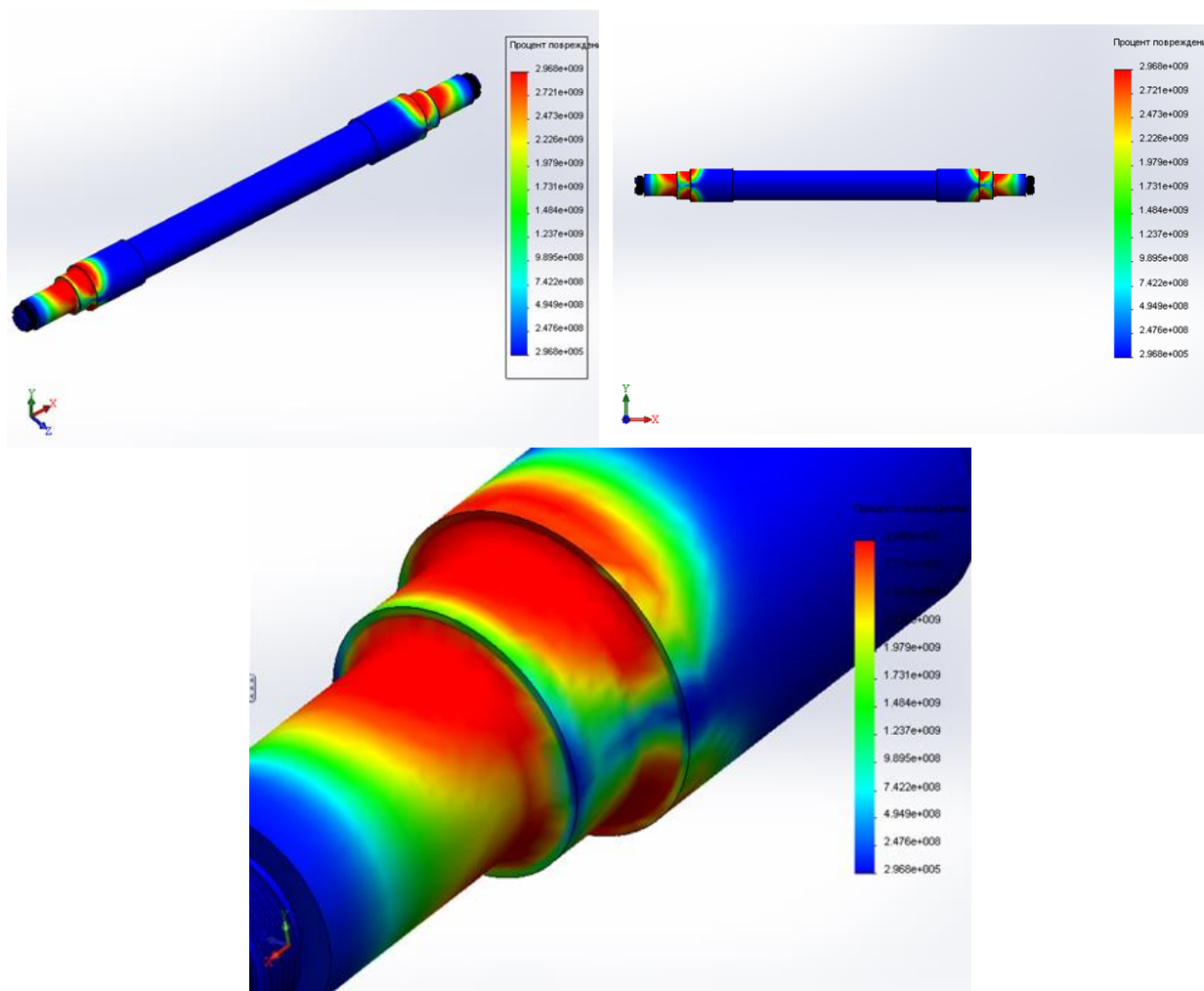


Рис. 7. Втомне пошкодження осі пасажирського вагона

Очевидно, що місця максимальної концентрації втоми повністю збігаються з розподілом напружень в елементах осі.

Таким чином, вісь колісної пари при заданих навантаженнях та медіанному

значенні межі витривалості сталі ОсВ може витримати до $6,24 \cdot 10^9$ циклів навантаження.

Приймаючи, що середній добовий пробіг вагона складає 1000 км, це відповідатиме строку експлуатації осей 48,3 року.

Висновки:

- проаналізовано рівень навантажень, що діють на колісну пару пасажирського вагона в експлуатації. Визначено, що при найбільш несприятливому збігу навантажень розрахункова сумарна вертикальна сила, що діє на одну з шийок осі (без урахування дії сил інерції) складатиме 109.73 кН (приблизно 10 тс). Вертикальне інерційне навантаження дорівнюватиме 17,2 кН;

- розроблено геометричну модель колісної пари РУ1-950 з урахуванням усіх конструктивних особливостей останньої. Створена модель у подальшому була перетворена у скінченно-елементну модель. Остаточна скінченно-елементна модель складалася з 212753 скінченних елементів та 2130210 вузлів;

- проведено розрахунки осі на міцність. Визначено, що найбільш вразливим місцем є галтель у місці переходу від шийки до передпідматочинної частини осі. Максимальні напруження, що виникають в осі пасажирського вагона за найбільш несприятливих умов завантаження, не перевищують 52 МПа. Конструкція осі з великим запасом міцності задовольняє вимоги чинних нормативних документів;

- виконано розрахунок осі на втому. Результати розрахунків свідчать, що вісь уздовж усієї довжини при експлуатаційних навантаженнях може витримати близько $6,2 \cdot 10^9$ циклів навантажень. Значення довговічності осі, виходячи з пробігу колісної пари, складатиме 48,3 року експлуатації.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 7774:2015. Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальнотехнічні норми для розрахування та проектування механічної частини вагонів. Чинний від 2016-04-01. Київ: Мінекономрозвитку України, 2017. 189 с.
2. Колісні пари вагонів магістральних залізниць колії 1520 мм (конструкція, технічне обслуговування та ремонт): підручник для навчальних закладів залізничного транспорту / С. В. Панченко, А. О. Каграманян, І. Д. Борзилов та ін.; за заг. ред. С. В. Панченка. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 63–70.
3. Чупраков Е. В., Мельниченко О. В. Оценка прочности оси колесной пары дифференциального исполнения. *Вестник ИрГТУ*. 2013. №10 (81). С. 3–9.
4. EN13103-Railway Application-Wheelset and Bogies-Non- Powered Axles-Design Method.
5. EN13261-March 2009-Railway Application-Wheelset and Bogies-Axles-Product Requirements.
6. Novosad M., Fajkos R., Reha B., Reznicek R. Fatigue tests of railway axles. *Proc. Eng.* 2 (2010). 2259-2268.
7. Grubisic V., Fischer G. Railway axle failures and durability validation. *Proc. I MechE Part F* (2012). URL: <https://doi.org/10.1177/0954409712442325>.
8. Исследование сопротивления усталости осей вагонов типов РУ1 и РУ1Ш колесных пар грузовых вагонов, восстановленных методом плазменно-дуговой металлизации шеек и подступичных частей / С. В. Бондарев, С. А. Гаврилов, Н. Т. Ольгард, С. А. Чебуров. *Рейковий рухомий склад: збірник наукових праць ДП УкрНДІВ*. 2010. № 2. С. 23–27.
9. Weber J. D. Numerical Structural Analysis in Railway Axle Design Methods, ETH Zurich Centre of Structure Technologies, Document Reference: 11-056, 2011.
10. Guo T., Wang Y. Study on Repair Fatigue Damage of Axle Shaft Mechanical Parts, in: Second International Conference on Information and Computing Science (ICIC 2009). Vol. 4: Modelling and Simulation in Engineering.

11. Hirakawa K., Toyama K., Kubota M. The analysis and prevention of failure in railway axles. *Int. J. Fatigue* 20 (2) (1998) 135-144.
12. Alihosseini H., Dehghani K. Modeling and failure analysis of a broken railway axle: effects of surface defects and inclusions. *J. Fail. Anal. Preven.* 10 (2010) 233-239.
13. Luo R. K., Gabbitas B. L., Brickle B.V. Fatigue life evaluation of a railway vehicle bogie using an integrated dynamic simulation, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit* 208 (1994) 123.
14. Dedmon L., Pilch J. M., Lonsdale C. P. A Comparison of Railroad Axle Stress Results Using Different Design Sizes, Loading Criteria And Analysis Methods, in: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2001.

Мартинов Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD:0000-0002-0481-3514. Тел.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Труфанова Альона Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD:0000-0003-1702-1054. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Петухов Вадим Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4781-9956. E-mail: petuhov@kart.edu.ua.

Шовкун Вадим Олександрович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053.Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com.

Igor Martynov, D. Sc. (Tech.). professor, department of wagons, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID 0000-0002-0481-3514. Tel. (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Alena Trufanova, PhD (Tech). associate professor, department of wagons, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Vadim Petukhov, PhD (Tech). associate professor, department of wagons, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-35. ORCID: 0000-0003-4781-9956. E-mail: petuhov@kart.edu.ua.

Vadim Shovkun, PhD (Tech). senior lecturer, department of wagons, Ukrainian State University of Railway Transport, ORCIDID 0000-0003-1826-6053. Tel. (057) 730-10-35. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com.

Статтю прийнято 10.11.2020 р.