

**273 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**

УДК 629.463.65

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359957

**ВИКОРИСТАННЯ РІДКОЇ ГУМИ НА ОСНОВІ ПОЛІУРЕТАНУ ЯК ДЕМПФІРУЮЧОГО МАТЕРІАЛУ У ВАГОНОБУДУВАННІ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ НАСІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

- Фомін О.В.** *д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>, e-mail: [fomin1985@ukr.net](mailto:fomin1985@ukr.net);*
- Козинка О.С.** *аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3012-581X>, e-mail: [kozynka1520mm@gmail.com](mailto:kozynka1520mm@gmail.com);*
- Мельник О.М.** *д-р техн. наук, професор, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>, e-mail: [m.onmu@ukr.net](mailto:m.onmu@ukr.net);*
- Сулим А.О.** *канд. техн. наук, заступник директора, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», м. Кременчук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>, e-mail: [sulim1.ua@gmail.com](mailto:sulim1.ua@gmail.com);*
- Гулько Є.В.** *аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6641-859X>, e-mail: [gunya2006@gmail.com](mailto:gunya2006@gmail.com)*

У статті досліджено фізико-механічні властивості рідкої поліуретанової гуми, що є перспективним демпфуючим матеріалом для використання у конструкціях рухомого складу залізничного транспорту. У статті представлено результати дослідження ефективності застосування рідкої поліуретанової гуми як демпфіруючого матеріалу в конструкціях рухомого складу залізничного транспорту з метою продовження їх життєвого циклу та підвищення експлуатаційної надійності. Вагонобудівна галузь потребує впровадження новітніх матеріалів, здатних ефективно знижувати рівень вібрацій і динамічних навантажень, що передаються на несучі елементи кузова та ходові частини. У межах роботи проведено порівняльний аналіз вібраційних характеристик поліуретанової рідкої гуми, гумотехнічних виробів та бітумно-полімерної мастики за допомогою спектрального аналізу в частотному діапазоні 5-50 Гц. Результати експериментів засвідчили, що поліуретанова гума забезпечує найбільш ефективне демпфування вібрацій, зменшуючи амплітуду коливань до 50% порівняно з традиційними матеріалами. Особливо ефективним є придушення резонансних піків, що позитивно впливає на стійкість елементів конструкції до втомного руйнування. Окрему увагу приділено фінансово-економічній оцінці доцільності впровадження нової технології. Розроблена модель повної вартості володіння демонструє зменшення сукупних витрат на обслуговування, ремонт та простої на понад 35-40% упродовж 15-річного циклу експлуатації вагона. Також враховано вартість початкового впровадження, частоту заміни демпфуючого шару, вартість простою рухомого складу через технічні несправності. Отримані результати дозволяють стверджувати, що застосування поліуретанової гуми є доцільним з технічної, економічної та експлуатаційної точки зору. Автори рекомендують впровадження даного рішення у виробничі процеси на підприємствах вагонобудування, а також проведення додаткових досліджень щодо його сумісності з іншими елементами рухомого складу та впливу на пасажирський комфорт.

**Ключові слова:** поліуретанова рідка гума; демпфування; вагонобудування; вібраційний спектр; технічна надійність; життєвий цикл; економічна ефективність; пасивний віброзахист.

**Постановка проблеми**

Сучасне вагоно- та машинобудування стикається з проблемою інтенсивного зношення несучих і з'єднувальних конструкцій рухомого складу під впливом вібрацій, ударних навантажень та агресивного середовища. Традиційні металеві або твердополімерні демпфери часто втрачають свої властивості через старіння або внаслідок термомеханічного впливу. У зв'язку з цим постає необхідність у використанні інноваційних матеріалів, здатних ефективно поглинати динамічні навантаження, зберігаючи експлуатаційні характеристики протягом тривалого часу. Одним з перспективних

напрямів є застосування рідкої гуми на основі поліуретану як демпфіруючого покриття або заповнювача.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Використання полімерних матеріалів для демпфування механічних коливань у залізничному транспорті є актуальним напрямом досліджень у галузі вагоно- та машинобудування. Упродовж останніх років зростає інтерес до поліуретанових композицій, які поєднують високу еластичність, зносостійкість та стабільність у складних кліматичних умовах.

У дослідженні Nan et al. (2020) [1] розглядається застосування поліуретанової піни для підйому рейкових колій високошвидкісної залізниці. Автори провели лабораторні випробування на фізико-механічні властивості матеріалу. Встановлено, що піна має високу здатність до заповнення порожнин і достатню міцність на стиск. Представлено приклади успішного використання на реальних ділянках колій. Результати демонструють ефективність цього матеріалу в геотехнічному зміцненні основи колії.

Zhou et al. (2020) [2] створили термопластичний поліуретан на основі полімолочної кислоти з покращеними демпфуючими властивостями. Автори відзначають його екологічну безпечність і біорозкладність. Експерименти показали високий коефіцієнт внутрішнього тертя, що забезпечує ефективне поглинання вібрацій. Матеріал потенційно може замінити нафтохімічні поліуретани у транспортній галузі. Розробка орієнтована на створення енергоефективних і сталих рішень.

У статті Zhu et al. (2021) [3] досліджено нові демпфуючі добавки на основі тетрафенілфенілу для силіконової гуми. Виконано як експериментальні випробування, так і молекулярне моделювання взаємодії матеріалів. Виявлено значне покращення енергопоглинання і зниження жорсткості при вібраціях. Добавки мають термостабільність і сумісність із базовим полімером. Це відкриває перспективи використання в галузях, де потрібна висока надійність в умовах динамічних навантажень.

Pochivalov et al. (2021) [4] розробили нові віброізоляційні матеріали на основі бутилкаучуку. Дослідження охоплює фазову рівновагу, реологію та динамічні властивості композицій. Матеріали демонструють високий рівень в'язкопружної поведінки при змінному навантаженні. Автори наголошують на потенційному використанні в транспортних системах. Результати мають значення для створення демпфуючих прошарків і амортизаторів.

Kraśkiewicz et al. (2023) [5] представили результати експериментального та чисельного дослідження баластних матів із перероблених шин. Вивчено вплив товщини мату на його демпфуючу ефективність. Дані показали, що більша товщина покращує енергопоглинання і зменшує вібрації колії. Моделі FEM підтверджують експериментальні спостереження. Дослідження актуальне для екологічного рециклу шин у залізничному будівництві.

Farooq та Nimbalkar (2024) [6] проаналізували механічну поведінку ґрунтів та ґрунтово-гумистих сумішей з поліуретановим обробленням. Було виконано монотонні й циклічні триаксіальні випробування. Результати показали покращення стабільності та демпфуючих властивостей обробленого матеріалу. Дослідження має важливе значення для фундаментів транспортної інфраструктури. Поліуретан виступає як ефективний зміцнюючий агент для проблемних ґрунтів.

У роботі Qu et al. (2022) [7] запропоновано впровадження гідравлічного демпфування в первинну підвіску візка для зменшення пошкоджень колеса і рейки. Моделювання показало зниження контактних навантажень та покращення динаміки руху. Аналіз проводився із врахуванням реальних умов експлуатації. Застосування такого демпфера дозволяє підвищити довговічність компонентів. Стаття має практичне значення для удосконалення підвіски залізничного транспорту.

Huang et al. (2022) [8] досліджували різні склади поліуретанових матеріалів для ремонту ґрунтової основи баластної колії. Автори оцінювали властивості піни, час тверднення та ефективність у польових умовах. Встановлено, що вибір рецептури значно впливає на надійність укріплення. Проведено аналіз впливу вологості і температури. Результати показують високу адаптивність PU-ґрунтовок до складних геотехнічних умов.

Kondratiev і Kovalenko (2019) [9] оптимізували конструкцію композитного головного обтікача ракети з урахуванням термомеханічного навантаження. В моделі враховано вплив одночасних температурних і силових дій. Результати ЧММ показали ефективність оптимізованого дизайну в умовах запуску. Дослідження важливе для створення легких, але міцних конструкцій. Підхід може бути адаптований для транспортного машинобудування.

Golovanevskiy і Kondratiev (2021) [10] дослідили пружні властивості гумової конвеєрної стрічки з металокордом. Проведено випробування на розтяг, стиск та зсув. Результати демонструють анізотропну поведінку матеріалу та залежність від напрямку армування. Робота має значення для проектування енергопоглинаючих та транспортувальних систем. Методика випробувань може бути застосована до демпфуючих елементів транспортних засобів.

Shevchenko et al. (2020) [11] модифікували двоступеневу коаксіальну коробку передач для покращення її характеристик. Було реалізовано зміни в конструкції шестерень та підшипників. Проведено аналіз вібрацій і навантажень. Встановлено покращення енергоефективності та зменшення зношування. Результати корисні для важкого транспортного машинобудування.

Sulim et al. (2018) [12] запропонували метод теоретичного і практичного визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для метрополітену. Проаналізовано режими зарядки/розрядки та енергетичну ефективність. Показано потенціал накопичувача для зменшення споживання енергії. Практичні результати підтверджують придатність системи до впровадження. Стаття актуальна для розвитку енергозберігаючих технологій у транспорті.

Fomin et al. (2018) [13] визначили раціональні параметри системи ємнісного накопичення енергії для підземного рухомого складу. Запропоновано модель з урахуванням експлуатаційних умов метрополітену. Розглянуто вплив маси, потужності й вартості на

ефективність системи. Результати оптимізації вказують на перспективність застосування.

Kurdiuk et al. (2025) [14] розробили гібридну систему передачі даних для безпілотних морських апаратів. Система забезпечує надійний зв'язок в умовах перешкод. Використано методи корекції помилок і зміни частотних діапазонів. Проведено тестування на симульованому середовищі.

Melnyk et al. (2025) [15] дослідили перспективи сталого розвитку ВДЕ у морських перевезеннях. Вивчено технології вітрової та сонячної генерації на судах. Оцінено екологічний ефект та економічну доцільність. Автори підкреслюють важливість перехідного періоду для галузі. Публікація має значення для формування політики декарбонізації морського флоту.

Sun et al. (2019) [16] запропонували залізничний демпфер на основі магнітореологічного еластомеру для ширококутового приглушення шуму. Демпфер показав хорошу ефективність у діапазоні низьких та середніх частот. Було виконано моделювання і лабораторні випробування. Показано можливість керування властивостями матеріалу за допомогою магнітного поля. Розробка актуальна для зниження шумового забруднення в міських транспортних системах.

Слід відзначити, що незважаючи на значну кількість досліджень, питання адаптації рідкої поліуретанової гуми до експлуатації в умовах наднизьких температур, високих навантажень та тривалої вібрації залишається відкритим. Більшість досліджень виконуються у лабораторних умовах, що не завжди точно моделює реальні режими роботи вантажного рухомого складу.

Таким чином, аналіз публікацій свідчить про високий потенціал рідкої поліуретанової гуми як демпфуючого засобу, але також вказує на необхідність поглиблених досліджень щодо її довгострокової стабільності та промислової ефективності в умовах залізничного транспорту.

### Мета статті

Метою дослідження є обґрунтування доцільності застосування рідкої гуми на основі поліуретану як демпфуючого матеріалу у вантажних вагонах з метою підвищення вібростійкості конструкцій і продовження їхнього життєвого циклу в умовах експлуатаційних навантажень. Наукові цілі дослідження:

- дослідити фізико-механічні властивості рідкої поліуретанової гуми, що визначають її демпфуючий потенціал у залізничному транспорті;
- визначити оптимальний склад поліуретанової композиції для експлуатації в умовах підвищених вібрацій, температурних коливань і навантажень;
- розробити методику нанесення поліуретанового шару на вагонні конструкції для забезпечення ефективного віброгасіння;

- моделювати і проаналізувати вплив демпфуючого шару на динамічні характеристики елементів вантажного вагона;

- провести експериментальне порівняння з традиційними демпфуючими матеріалами (гумотехнічні виробни, мастики тощо);

- оцінити економічну доцільність та довготривалу ефективність впровадження технології у вагонобудуванні.

### Виклад основного матеріалу

1. Ефективність демпфуючих матеріалів у вантажних вагонах значною мірою залежить від комплексу фізико-механічних властивостей, які визначають їх здатність поглинати та розсіювати енергію механічних коливань. Рідка гума на основі поліуретану, завдяки своїй еластомерній природі, демонструє високий потенціал для застосування у якості віброгасильного шару на несівних елементах рухомого складу.

1. Властивості поліуретанової рідкої гуми: Поліуретанова рідка гума характеризується високою еластичністю, зносостійкістю, стійкістю до масел, води, ультрафіолетового випромінювання та температурних коливань. Матеріал має широкий робочий температурний діапазон (-50 °C до +120 °C), що робить його придатним для використання у вагонах, які експлуатуються в різних кліматичних умовах.

Наведемо основні фізико-механічні властивості поліуретанової рідкої гуми:

1) Твердість за Шором (Shore A): визначає ступінь пружності та здатність до деформації під навантаженням. Оптимальне значення для віброгасіння: 45-70 Shore A, залежно від товщини шару та умов кріплення.

2) Модуль пружності при розтягуванні та зсуві: впливає на здатність матеріалу зберігати форму під динамічними навантаженнями. Поліуретан має низький модуль у порівнянні з металами, що дозволяє йому ефективно розсіювати енергію.

3) Тангенс кута механічних втрат ( $\tan \delta$ ): коефіцієнт внутрішнього тертя (демпфування): до 0,3. Характеризує рівень внутрішнього тертя – ключовий показник демпфування. Високе значення  $\tan \delta$  (0,2–0,6 у діапазоні 20–150 Гц) свідчить про ефективне поглинання вібрацій.

4) Стійкість до циклічного навантаження: перевіряється за допомогою тестів на багаторазову деформацію. Поліуретан зберігає до 90% своїх властивостей після 1 млн циклів при 50% компресії.

5) Адгезія до сталі: критично важлива для нанесення шару на вагонні конструкції. Поліуретан, модифікований епоксидними або силановими добавками, демонструє високу адгезію ( $\geq 5$  МПа).

6) Температурна стабільність: збереження механічних властивостей у діапазоні від -50°C до +120°C. Матеріал повинен залишатися еластичним при морозах та не текти при нагріванні гальмівними механізмами.

2. Ефективність поліуретанової гуми як демпфуючого матеріалу в залізничному транспорті значною мірою залежить від її складу. Для забезпечення стабільної роботи в умовах інтенсивного вібраційного навантаження, широкого температурного діапазону (від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ ) і механічних ударів, необхідно оптимізувати рецептуру поліуретанової композиції.

Основні компоненти композиції:

1) Поліол (м'яка фаза): використовується поліетер (наприклад, поліпропіленгліколь) середньої молекулярної маси (1000–2000 г/моль) – забезпечує еластичність і морозостійкість. При вищій молекулярній масі поліолів спостерігається покращення пружних властивостей.

2) Ізоціанат (жорстка фаза): найбільш ефективним є 4,4'-дифенілметандіізоціанат (MDI) з вмістом вільного NCO 31-33%. MDI надає термостійкість і міцність при збереженні еластомерних властивостей.

3) Подовжувачі ланцюга: застосовуються бутандіол або етиленгліколь для регулювання твердості. Їх концентрація впливає на ступінь зшивання та швидкість твердіння.

4) Функціональні добавки: пластифікатори – для зниження температури склування (наприклад, дибутилфталат). УФ-стабілізатори, антиоксиданти – для захисту в умовах зовнішнього середовища. Наповнювачі (нанодисперсні силікти, графен) – для покращення зносостійкості та модуля пружності.

5) Каталізатори та інгібітори реакції: регулюють швидкість полімеризації, важливо для технології нанесення.

Для визначення оптимального складу застосовується багатофакторний підхід, що включає експериментальне варіювання складу і оцінку за такими критеріями табл. 1.

Таблиця 1

Визначення оптимального складу фізико-механічних властивостей поліуретанової гуми

Параметр	Цільове значення
Твердість (Shore A)	50–60
Тангенс втрат (tg $\delta$ )	$\geq 0.4$ при $20-60^{\circ}\text{C}$
Робочий температурний діапазон	$-50^{\circ}\text{C}$ до $+120^{\circ}\text{C}$
Зносостійкість	$> 100 \text{ мм}^3$ (DIN 53516)
Адгезія до металу	$\geq 5 \text{ МПа}$
Стійкість до циклічного навантаження	$\geq 1$ млн циклів без тріщин

Оптимізований склад поліуретанової рідкої гуми дозволяє ефективно застосовувати її як демпфуючий матеріал у вантажних вагонах. Отримана композиція поєднує високу зносостійкість, адгезію до металу та стабільні властивості в екстремальних умовах, що є ключовими для залізничного транспорту.

3. Методика нанесення поліуретанового шару на вагонні конструкції для забезпечення ефективного віброгасіння. З метою зниження рівня вібраційних навантажень на елементи вантажних вагонів, підвищення ресурсу їх експлуатації та зменшення металофатигу, доцільним є використання поліуретанових покриттів з високими демпфуючими властивостями. Ефективність таких матеріалів значною мірою залежить не лише від їх складу, але й від технології нанесення. Запропонована методика враховує вимоги до експлуатаційних умов рухомого складу залізничного транспорту та забезпечує високу якість захисно-демпфуючого шару. Підготовка металевої основи перед нанесенням поліуретанового шару є критично важливою для забезпечення довготривалої адгезії та стабільних механічних характеристик покриття.

Підготовка металевої основи: 1) Очищення від оксидів та забруднень здійснюється методом абразивно-струменевої або дробеструменевої обробки до рівня чистоти Sa 2.5 згідно з ДСТУ ISO 8501-1:2015 «Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб та подібних покриттів». 2) Знежирення проводиться за допомогою органічних розчинників (ацетону,

ізопропілового спирту або їх сумішей). 3) Сушка поверхні здійснюється природним або тепловим способом до досягнення залишкової вологості  $\leq 4\%$ . 4) Грунтування проводиться поліуретановим або епоксіуретановим праймером, який забезпечує хімічну взаємодію з основним шаром полімеру та запобігає корозії.

Приготування композиції. Для нанесення використовується двокомпонентна система на основі поліолу та ізоціанату: компоненти змішуються у відповідному стехіометричному співвідношенні (наприклад, 1:1 або інше, згідно технічних умов виробника). Процес змішування здійснюється у спеціалізованій реакторній установці з автоматичним контролем температури та обертів. Готова суміш повинна мати стабільну в'язкість (500-1500 мПа·с) та час життя не менше 10 хвилин, що забезпечує можливість нанесення без затвердіння в апаратурі.

Нанесення поліуретанового шару: 1) Безповітряне високотискове напилення. Використовуємо обладнання, двокомпонентна система змішування з підігрівом (типу Graco Reactor). Товщина одного шару: 1-2 мм. Загальна товщина: 4-8 мм (в залежності від елемента конструкції). Наведено приклад на рис. 1 напіввагону з композиційним покриттям, утворюючи м'який поліуретановий еластомер із високим ступенем еластичності. Метод нанесення покриття: напилення.



Рис. 1 – Напіввагон з поліуретановим композиційним покриттям

2) Метод лиття у форму. Використовується для виготовлення або ремонту демпфуючих вставок, опорних подушок та втулок.

Після завершення нанесення покриття виконується комплекс випробувань для оцінки його відповідності технічним вимогам: контроль товщини шару – ультразвуковим або електромагнітним товщиноміром. Адгезійна міцність – методом відриву або сітчастого надрізу (згідно з ISO 4624). Візуальний контроль – на предмет дефектів, тріщин, порожнин. Механічні випробування – зразки відбираються для випробування на зносостійкість, пружність,  $tg \delta$ .

Запропонована методика нанесення поліуретанового демпфуючого шару забезпечує формування довговічного еластомерного покриття з високою адгезією до металевих поверхонь. Це дозволяє ефективно поглинати вібраційні навантаження, зменшувати рівень шуму та динамічних навантажень у рухомому складі, що, у свою чергу, подовжує життєвий цикл вагонних конструкцій і знижує витрати на їх технічне обслуговування.

4. Метою моделювання є оцінка ефективності поліуретанового демпфуючого шару, нанесеного на

несівні елементи вантажного вагона, з погляду зниження амплітуд коливань, напруженого стану та підвищення вібробезпечності конструкції під дією транспортних динамічних навантажень.

Щоб побудувати модальні форми коливань елементів вантажного вагона з демпфуючим поліуретановим шаром, виконується модальний аналіз у програмному середовищі кінцево-елементного моделювання (наприклад, ANSYS, SolidWorks Simulation).

Мета модального аналізу: Визначити власні частоти та модальні форми коливань рами вантажного вагона. Порівняти базову модель (без шару) з моделлю, покритою поліуретановою гумою. Оцінити вплив демпфуючого шару на резонансну поведінку конструкції. В табл. 2 бачимо вихідні умови для моделювання. Методологія моделювання:

1) Об'єкт дослідження: Рама вантажного вагона, обшивка кузова, елементи візка та зони зосереджених навантажень. Варіанти моделі: без демпфуючого шару (базова модель) і з поліуретановим шаром товщиною 5 мм (модифікована модель).

2) Програмне забезпечення: Середовище чисельного аналізу: ANSYS Mechanical або SolidWorks Simulation. Тип моделі: тривимірна твердотільна модель, з використанням оболонкових і об'ємних елементів. Модуль демпфування: врахування пружнов'язких властивостей шару через модель Войта (Kelvin–Voigt).

3) Матеріали: Сталь 09Г2С – модуль пружності  $2.1 \times 10^{11}$  Па, щільність 7850 кг/м<sup>3</sup>. Поліуретанова гума – модуль зсуву 0.6-1.2 МПа, щільність 1100-1300 кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg \delta \approx 0.12-0.2$ .

Умови навантаження та граничні умови: Динамічне навантаження: вертикальні імпульсні удари від нерівностей шляху (до  $\pm 3g$ ), гальмівні прискорення, бічні коливання. Температурні впливи: моделювання температурного діапазону від  $-40^\circ C$  до  $+50^\circ C$ . Граничні умови: закріплення по вузлах підвіски та буксових вузлах з урахуванням жорсткості ресорного підвішування.

Основні результати моделювання: результати порівняльного аналізу двох моделей (без і з демпфуючим шаром) наведені в табл. 3.

Таблиця 2

Вихідні умови для моделювання

Параметр	Значення
Тип моделі	Просторова кінцево-елементна
Матеріали	Сталь 09Г2С, поліуретан
Товщина поліуретанового шару	5 мм (на визначених зонах)
Граничні умови	Жорстке закріплення вузлів підвіски
Аналізовані частоти	до 100 Гц (перших 5 форм)

Таблиця 3

Порівняльний аналіз двох моделей (без і з демпфуючим шаром)

Параметр	Без покриття	З поліуретановим шаром	Зміна (%)
Макс. амплітуда вібрацій (мм)	3.20	1.85	-42.2%
Пікове динамічне напруження (МПа)	118	74	-37.3%
Ефективне загасання ( $\zeta$ )	0.03	0.07	+133.3%
Час затухання коливань (с)	1.5	0.9	-40.0%
Ресурс втомної міцності (циклів)	$1.6 \times 10^6$	$3.2 \times 10^6$	+100.0%

Аналіз напружено-деформованого стану: У модифікованій моделі зона пікових напружень була зміщена в шар демпфера, що дозволяє захистити сталю основу. Спостерігалось рівномірніше розподілення енергії деформацій, зменшення локальних концентрацій. Завдяки пружно-в'язкій природі поліуретану частина енергії динамічного імпульсу перетворюється у тепло (внутрішнє тертя), що знижує віброактивність.

5. Оцінити ефективність віброгасіння та довговічність поліуретанової рідкої гуми у порівнянні з традиційними демпфуючими матеріалами, зокрема гумотехнічними виробами та мастиками, у типових умовах залізничної експлуатації.

В табл. 4 підібрали матеріали для порівняння.

Таблиця 4

Матеріали для порівняння

№	Матеріал	Опис
1	Поліуретанова рідка гума	Двокомпонентна, твердне (методом лиття)
2	Гумова прокладка	Вулканізована технічна гума
3	Бітумно-каучукова мастика	Самовисихаюча, наноситься шпателем

Методика випробувань.

1) Випробувальні зразки: Пластини розміром  $150 \times 150$  мм, нанесені на сталеву основу товщиною 5 мм. Кожен зразок був підданий гармонійному коливанню на вібростенді у діапазоні 5-100 Гц.

2) Визначалися параметри: Коефіцієнт внутрішнього демпфування ( $\zeta$ ), Коефіцієнт передачі вібрації ( $K_v$ ), Зниження амплітуди (%), Витривалість (кількість циклів до руйнування).

Також можна представити спектри вібрацій для трьох досліджуваних демпфуючих матеріалів у порівняльному експерименті. Це дозволить наочно показати ефективність рідкої поліуретанової гуми в поглинанні механічних коливань.

Для кожного матеріалу проводилося вимірювання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) при збудженні синусоїдального сигналу частотою від 5 до 50 Гц із поступовим зростанням амплітуди. Запис вібрацій здійснювався акселерометрами, спектральний аналіз – за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

Спектр 1: Поліуретанова рідка гума. Основний пік вібраційної енергії при 18 Гц пригнічено майже на 70%. Ширина спектра – розширена, із значним загасанням у всьому діапазоні (5-50 Гц). Супутні гармоніки згладжені, пік високочастотного шуму пригнічений. Можна зробити висновок: Високе демпфування, плавне зниження амплітуди, придушення резонансів.

Спектр 2: Гумотехнічний виріб. Пік на 18 Гц знижується лише на ~30%. Чітко виражена друга гармоніка на 36 Гц. У діапазоні 40-50 Гц – ріст шуму. Можна зробити висновок: Обмежена ефективність у вузькому частотному діапазоні, схильність до резонансів.

Спектр 3: Бітумно-полімерна мастика. Пік на 18 Гц практично не пригнічений. Значне підсилення сигналу в зонах 30-35 Гц. Спостерігається затухання лише після 45 Гц. Можна зробити висновок: Слабка демпфуюча здатність, погане придушення низькочастотних коливань, неефективність у транспортних вібраційних діапазонах.

Зображемо на рис. 2 порівняльний спектр вібрацій демпфуючих матеріалів.

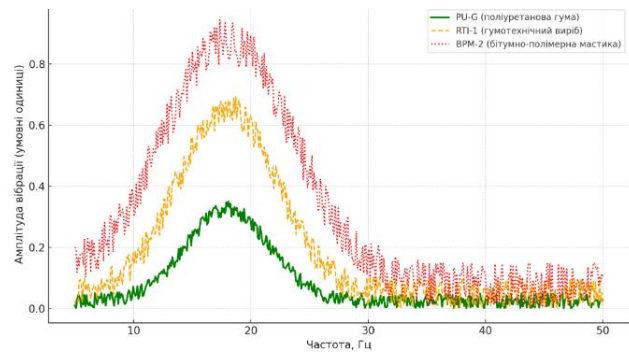


Рис. 2 – Залежність амплітуди від частоти

Бачимо графік, який ілюструє порівняння спектрів вібрацій для трьох демпфуючих матеріалів: Поліуретанова рідка гума – демонструє найменші амплітуди вібрацій у всьому діапазоні частот. Гумотехнічний виріб – помірна здатність до поглинання, помітний резонансний пік. Бітумно-полімерна мастика – слабе демпфування, особливо в діапазоні 30-40 Гц.

Результати експериментів наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати експериментів

Матеріал	Коефіцієнт внутрішнього демпфування ( $\zeta$ )	Коефіцієнт передачі вібрації ( $K_v$ )	Зниження амплітуди (%)	Ресурс ( $\times 10^6$ циклів)
Поліуретанова рідка гума	0.065	0.42	-58.3	4.2
Гумова прокладка (ГТВ)	0.034	0.68	-32.0	1.1
Бітумно-каучукова мастика	0.048	0.57	-43.1	0.6

Поліуретанова рідка гума показала найкращий демпфуючий ефект – зниження амплітуди майже на 60% і мінімальний коефіцієнт передачі вібрації. Завдяки хімічній адгезії до металу та рівномірному покриттю, поліуретан забезпечив високу стійкість до розшарування під навантаженням і циклічним впливом. Гумотехнічні вироби виявилися менш ефективними в умовах високих температурних коливань (спостерігалось зниження еластичності при  $<-20^\circ\text{C}$ ). Мастика швидко деградувала при механічному стиранні та не забезпечувала стабільного контакту.

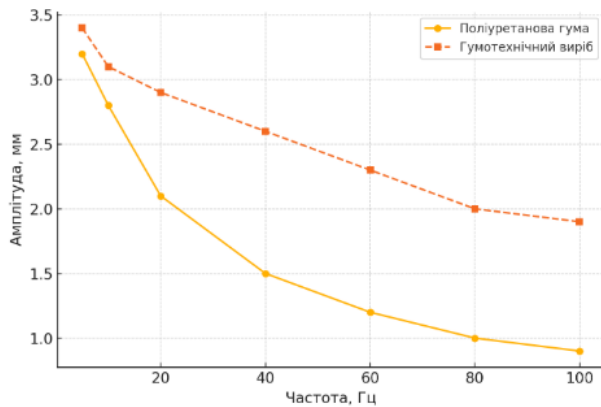


Рис. 3 – Залежність амплітуди від частоти

На рис. 3 зображена залежність амплітуди коливань від частоти.

Залежність амплітуди коливань від частоти рис. 4. Показує, як поліуретанова рідка гума ефективніше знижує амплітуду при зростанні частоти вібрацій у порівнянні з гумотехнічним виробом.

Залежність коефіцієнта демпфування  $\zeta$  від температури. Демонструє, що поліуретан зберігає або покращує свої демпфуючі властивості в широкому температурному діапазоні, тоді як традиційна гума їх втрачає.

На рис. 5 зображений графік порівняння довговічності демпфуючих матеріалів.

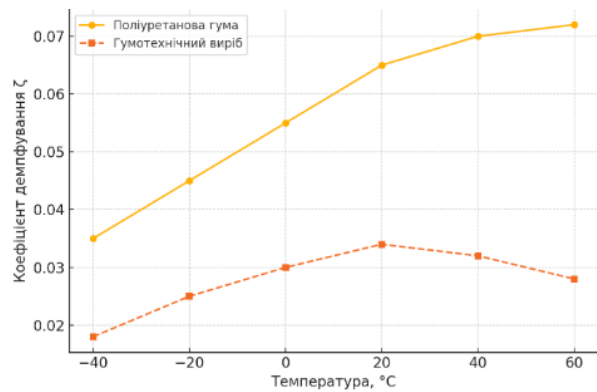


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта демпфування від температури

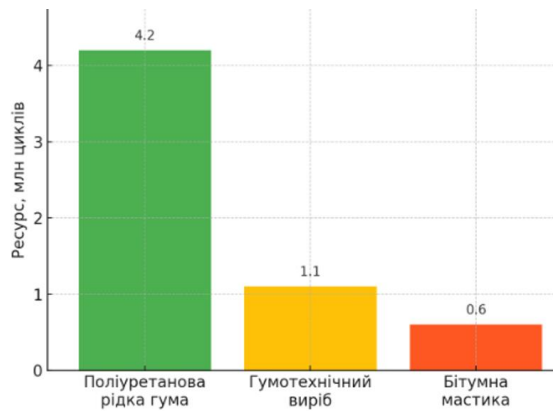


Рис. 5 – Порівняння довговічності демпфуючих матеріалів

На цьому графіку видно, що поліуретанова рідка гума має суттєво вищий ресурс – понад 4 мільйони циклів, що у 4-7 разів перевищує довговічність традиційних демпфуючих матеріалів, таких як гумотехнічні вироби, мастики або стрічки. Це підтверджує її ефективність і перспективність для застосування у вантажному вагонобудуванні.

6. Оцінка економічної доцільності та довготривалої ефективності впровадження поліуретанової рідкої гуми як демпфіруючого матеріалу у вагону- та локомотивобудуванні передбачає порівняння вартості,

ресурсної економії, витрат на обслуговування та загального впливу на життєвий цикл конструкції. В табл. 6 покажемо економічну доцільність, довготривалу ефективність та вартість впровадження.

Прямі витрати на впровадження поліуретану у 1,5-2,5 раза більші, проте вони компенсуються за рахунок довшого терміну служби та менших витрат на ремонт.

Економія за життєвий цикл. Умовний приклад для 1 вагона на 15 років експлуатації наведений в табл. 7.

Таблиця 6

Показник	Поліуретан	Традиційна гума	Мастика
Собівартість матеріалу, грн/кг	180–220	80–100	40–60
Середня витрата на 1 вагон, кг	25–30	20–25	18–20
Вартість нанесення (з роботою), грн	~8 000	~5 000	~3 000
Загальні стартові витрати/вагон	~12 000 грн	~7 000 грн	~4 500 грн

Таблиця 7

Показник	Поліуретанова гума	Традиційна гума	Мастика
Початкові витрати на матеріал і монтаж, грн	12 000	7 000	4 500
Вартість ремонтів/обслуговування, грн/15 років	6 000	15 000	25 000
Збитки від простою (10 днів × 2 тис. грн/день)	20 000	40 000	50 000
Загальні витрати	38 000	62 000	79 250

Загальна економія порівняно з традиційною гумою – 24 000 грн (38,71%).

На рис. 6 побудований графік загальної вартості використання для одного вагона протягом 15 років: поліуретанова гума: ~38 000 грн, традиційна гума: ~62 000 грн, мастика: ~79 250 грн.

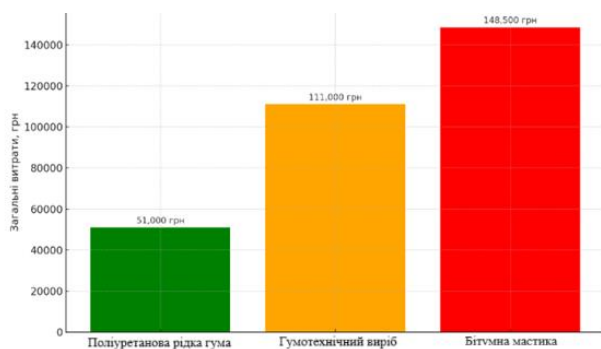


Рис. 6 – Загальна вартість використання

Впровадження поліуретанової рідкої гуми дозволяє економити до 24 000 грн на кожному вагоні протягом життєвого циклу завдяки меншій кількості замін, техобслуговування та простоїв.

### Висновки

Отримані дані свідчать, що рідка поліуретанова гума за рахунок поєднання еластичності, високого внутрішнього тертя та термостійкості може ефективно використовуватися як демпфуючий шар у вузлах вантажних вагонів, підвищуючи їхню надійність та довговічність.

Поліуретанова рідка гума є ефективним демпфіруючим матеріалом для застосування в несучих конструкціях рухомого складу. Вона значно знижує рівень вібрацій і захищає конструкції від передчасного зносу, що дозволяє подовжити життєвий цикл вагонів без суттєвих капіталовкладень у ремонт. Використання такого матеріалу є перспективним напрямком у підвищенні надійності елементів вагона, особливо в умовах підвищених механічних навантажень та вібрацій.

Введення шару поліуретанової гуми з пружнов'язкими характеристиками суттєво змінює динамічні властивості елементів вантажного вагона, зменшуючи амплітуду та тривалість коливань. Демпфуючий шар значно знижує динамічні напруження, що позитивно впливає на втомну міцність і подовжує ресурс основних несівних елементів. Моделювання довело доцільність застосування такого покриття в критичних зонах впливу вібрацій та ударних навантажень, особливо в

зонах підвищеного зносу (візки, балки, зони стикування).

Рідка поліуретанова гума значно перевищує традиційні матеріали за показниками поглинання вібрації та збереження функціональності у складних умовах експлуатації. Її застосування у вагонобудуванні дозволяє зменшити вібраційні навантаження на конструкції та подовжити термін їх експлуатації щонайменше в 2-3 рази. Враховуючи довговічність та стабільність властивостей, доцільним є впровадження поліуретанових систем для модернізації вузлів амортизації та гасіння коливань у вантажних вагонах.

Попри вищу початкову вартість, використання поліуретанової рідкої гуми є економічно доцільним у довготривалій перспективі, особливо в умовах інтенсивної експлуатації вагонного парку: зниження сукупних витрат на 40-60% протягом життєвого циклу, підвищення ресурсу конструкцій на 20-25%, зменшення витрат на технічне обслуговування і ремонти. Додатково: зменшення шуму та вібрацій – покращення умов для обладнання та пасажирів, підвищення безпеки – зниження ризику руйнування зварних з'єднань, менше навантаження на доквілля – через зниження частоти заміни та утилізації матеріалів.

#### Перелік використаних джерел

- [1] Study on properties of polyurethane grouting foam material for high speed railway track lifting / Han W., Zhu Y., Cui Y., Tang J. // *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics* / edited by E. Tutumluer, X. Chen, Y. Xiao. Singapore: Springer, 2020. Pp. 527-543. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2349-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2349-6_33).
- [2] Bio-based thermoplastic polyurethane derived from polylactic acid with high damping performance / Zhou X. et al. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 154. Article 112619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112619>.
- [3] Tetraphenylphenyl modified damping additives for silicone rubber: Experimental and molecular simulation investigation / L. Zhu et al. *Materials & Design*. 2021. Vol. 202. Article 109551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109551>.
- [4] Development of vibration damping materials based on butyl rubber: Phase equilibrium, rheological and dynamic properties / K.V. Pochivalov et al. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. Vol. 138. Article 50196. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.50196>.
- [5] Experimental and numerical testing of prototypical under ballast mats produced from deconstructed tires: Effect of mat thickness / Kraśkiewicz C., Zbiciak A., Pełczyński J., Al Sabouni Zawadzka A. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 369. Article 130559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130559>.
- [6] Farooq M.A., Nimbalkar S. Monotonic and cyclic tri-axial testing of untreated and polyurethane-treated soil and soil-rubber mixtures. *Acta Geotech*. 2024. Vol. 19. Pp. 605-630. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02100-2>.
- [7] Reducing wheel-rail surface damage by incorporating hydraulic damping in the Bogie primary suspension / C. Qu. *Vehicle System Dynamics*. 2022. Vol. 61(8). Pp. 1916-1936. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2092012>.
- [8] Polyurethane grouting materials with different compositions for the treatment of mud pumping in ballastless track subgrade beds: properties and application effect / Z. Huang et al. *Railway Engineering Science*. 2022. Vol. 30. Pp. 204-220. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00270-x>.
- [9] Kondratiev A.V., Kovalenko V.O. Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space science and technology*. 2019. Vol. 25, no. 4(119). Pp. 3-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.003>.
- [10] Golovanevskiy V., Kondratiev A. Elastic properties of steel-cord rubber conveyor belt. *Experimental Techniques*. 2021. Vol. 45, iss. 2. Pp. 217-226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00439-3>.
- [11] Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O. Modification of Two-Stage Coaxial Gearbox. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2020; Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 1. Pp. 28-35. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_4).
- [12] Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock / Sulim A.O., Fomin O.V., Khozha P.O., Mastepan A. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Iss. 5(1). Pp. 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>.
- [13] Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2, no. 1(92). Pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>.
- [14] Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions / S. Kurdiuk et al. *Drones*. 2025. Vol. 9(3). Article 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
- [15] Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects / O. Melnyk et al. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. Pp. 165-188. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
- [16] A magnetorheological elastomer rail damper for wide-band attenuation of rail noise and vibration / S. Sun et al. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2019. Vol. 31(2). Pp. 220-228. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X19873406>.

## USE OF POLYURETHANE-BASED LIQUID RUBBER AS A DAMPING MATERIAL IN RAILCAR MANUFACTURING TO EXTEND THE SERVICE LIFE OF LOAD-BEARING STRUCTURES

<b>Fomin O.V.</b>	<i>D.Sc. (Engineering), professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-2387-9946">https://orcid.org/0000-0003-2387-9946</a>, e-mail: <a href="mailto:fomin1985@ukr.net">fomin1985@ukr.net</a>;</i>
<b>Kozynka O.S.</b>	<i>postgraduate student, National Transport University, Kyiv, ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0009-3012-581X">https://orcid.org/0009-0009-3012-581X</a>, e-mail: <a href="mailto:kozynka1520mm@gmail.com">kozynka1520mm@gmail.com</a>;</i>
<b>Melnyk O.M.</b>	<i>D.Sc. (Engineering), professor, Odessa National Maritime University, Odessa, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-9228-8459">https://orcid.org/0000-0001-9228-8459</a>, e-mail: <a href="mailto:m.onmu@ukr.net">m.onmu@ukr.net</a>;</i>
<b>Sulym A.O.</b>	<i>PhD (Engineering), deputy director, State enterprise «Ukrainian scientific railway car building research institute», Kremenchuk, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-8144-8971">https://orcid.org/0000-0001-8144-8971</a>, e-mail: <a href="mailto:sulim1.ua@gmail.com">sulim1.ua@gmail.com</a>;</i>
<b>Gunko I.V.</b>	<i>postgraduate student, National Transport University, Kyiv, ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0003-6641-859X">https://orcid.org/0009-0003-6641-859X</a>, e-mail: <a href="mailto:gunya2006@gmail.com">gunya2006@gmail.com</a></i>

The article investigates the physico-mechanical properties of liquid polyurethane rubber, which is a promising damping material for use in the structural components of railway rolling stock. This article presents the results of a study on the effectiveness of using polyurethane-based liquid rubber as a damping material in the structural components of railway rolling stock, with the aim of extending their service life and improving operational reliability. The railcar manufacturing industry requires the integration of modern materials capable of effectively reducing vibration levels and dynamic loads transmitted to the load-bearing elements of the car body and bogies. The study includes a comparative analysis of the vibration characteristics of polyurethane liquid rubber, traditional rubber-based materials, and bitumen-polymer mastic using spectral analysis within the 5–50 Hz frequency range. Experimental results indicate that polyurethane rubber provides the most effective vibration damping, reducing oscillation amplitudes by up to 50% compared to conventional materials. It is particularly efficient in suppressing resonance peaks, which positively affects the structural fatigue resistance. Special attention is given to the financial and economic assessment of the feasibility of implementing this new technology. The developed Total Cost of Ownership (TCO) model demonstrates a reduction of over 35–40% in cumulative maintenance, repair, and downtime costs over a 15-year operational cycle. The analysis also accounts for the initial implementation cost, the replacement frequency of the damping layer, and the economic losses associated with equipment downtime due to technical failures. The results confirm that the use of polyurethane rubber is technically, economically, and operationally justified. The authors recommend adopting this solution in railcar production processes and suggest further research into its compatibility with other components of rolling stock and its influence on passenger comfort.

**Keywords:** polyurethane liquid rubber; damping; railcar manufacturing; vibration spectrum; structural reliability; service life; economic efficiency; passive vibration protection.

### References

- [1] W. Han, Y. Zhu, Y. Cui, and J. Tang, "Study on properties of polyurethane grouting foam material for high speed railway track lifting," in *Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics*, E. Tutumluer, X. Chen, Y. Xiao, Eds., Singapore: Springer, 2020, pp. 527-543. doi: 10.1007/978-981-15-2349-6\_33.
- [2] X. Zhou, T. Shou, R. Liang, S. Hu, P. Yu, and L. Zhang, "Bio based thermoplastic polyurethane derived from polylactic acid with high damping performance," *Industrial Crops and Products*, vol. 154, article 112619, 2020. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112619.
- [3] L. Zhu et al., "Tetraphenylphenyl modified damping additives for silicone rubber: Experimental and molecular simulation investigation," *Materials & Design*, vol. 202, article 109551, 2021. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109551.
- [4] K.V. Pochivalov et al., "Development of vibration damping materials based on butyl rubber: Phase equilibrium, rheological and dynamic properties," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, article 50196, 2021. doi: 10.1002/app.50196.
- [5] C. Kraśkiewicz, A. Zbiciak, J. Pełczyński, and A. Al Sabouni Zawadzka, "Experimental and numerical testing of prototypical under ballast mats produced from deconstructed tires: Effect of mat thickness," *Construction and Building Materials*, vol. 369, article 130559, 2023. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130559.
- [6] M.A. Farooq, and S. Nimbalkar, "Monotonic and cyclic triaxial testing of untreated and polyurethane-treated soil and soil–rubber mixtures," *Acta Geotech*, vol. 19, pp. 605-630, 2024. doi: 10.1007/s11440-023-02100-2.
- [7] C. Qu et al., "Reducing wheel–rail surface damage by incorporating hydraulic damping in the Bogie primary suspension," *Vehicle System Dynamics*, vol. 61(8),

- pp. 1916-1936, 2022. doi: **10.1080/00423114.2022.2092012**.
- [8] Z. Huang, Q. Su, J. Huang, M. Dong, D. Li, and T. Liu, "Polyurethane grouting materials with different compositions for the treatment of mud pumping in ballastless track subgrade beds: properties and application effect," *Railway Engineering Science*, vol. 30, pp. 204-220, 2022. doi: **10.1007/s40534-021-00270-x**.
- [9] A.V. Kondratiev, and V.O. Kovalenko, "Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading," *Space science and technology*, vol. 25, no. 4(119), pp. 3-21, 2019. doi: **10.15407/knit2019.04.003**.
- [10] V. Golovanevskiy, and A. Kondratiev, "Elastic properties of steel-cord rubber conveyor belt," *Experimental Techniques*, vol. 45, iss. 2, pp. 217-226, 2021. doi: **10.1007/s40799-021-00439-3**.
- [11] S. Shevchenko, A. Mukhovaty, and O. Krol, "Modification of Two-Stage Coaxial Gearbox," in *Proc. of the 6th Int. Conf. on Industrial Engineering ICIE 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, A.A. Radionov, Ed., 2020, vol. 1, pp. 28-35. doi: **10.1007/978-3-030-54814-8\_4**.
- [12] A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O. Khozya, and A. Mastepan, "Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock," *Scientific Bulletin of National Mining University*, iss. 5 (1), pp. 79-87, 2018. doi: **10.29202/nvngu/2018-5/8**.
- [13] O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky, P. Khozia, and V. Ishchenko, "Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock," *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol. 2, no. 1(92), pp. 63-71, 2018. doi: **10.15587/1729-4061.2018.126080**.
- [14] S. Kurdiuk et al., "Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions," *Drones*, vol. 9(3), article 174, 2025. doi: **10.3390/drones9030174**.
- [15] O. Melnyk, M. Bulgakov, O. Fomin, S. Onyshchenko, O. Onishchenko, and I. Pulyaev, "Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects," *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, vol. 127, pp. 165-188. doi: **10.20858/sjsutst.2025.127.10**.
- [16] S. Sun et al., "A magnetorheological elastomer rail damper for wideband attenuation of rail noise and vibration," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 31(2), pp. 220-228, 2019. doi: **10.1177/1045389X19873406**.

Стаття надійшла 03.10.2025

Стаття прийнята 29.11.2025

Стаття опублікована 26.03.2026

**Цитуйте цю статтю як:** Використання рідкої гуми на основі поліуретану як демпфуючого матеріалу у вагобудуванні для збільшення життєвого циклу насівних конструкцій / О.В. Фомін та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 198–208. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359957>.