

УДК 629.4.011:629.462.2

DOI https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-20

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ СПИРАННЯ КОТЛІВ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН

Каграманян Артур Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,

проректор з наукової роботи

Українського державного університету залізничного транспорту

ORCID ID: 0000-0003-3520-4911

Аракелян Тигран Артурович,

аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції

Українського державного університету залізничного транспорту

ORCID ID: 0009-0007-2062-6894

У статті на основі критичного аналізу наявних науково-технічних рішень виявлено такі системні недоліки традиційних систем спирання котлів вагонів-цистерн, як: відсутність адаптації до змінних динамічних навантажень, концентрація напружень у зварних зонах, низька демпфувальна здатність. На відміну від більшості відомих робіт, які пропонують переважно силове підсилення конструкції, у дослідженні обґрунтовано принципово інший підхід – кероване зниження динамічного навантаження через введення фрикційних зв'язків із пружними елементами. Сформульовано наукову новизну: вперше запропоновано комплексний критерій оптимізації системи «котел – опори – рама», який одночасно враховує жорсткісні, дисипативні та геометричні параметри вузлів спирання.

На основі аналізу наукових публікацій і технічних рішень визначено основні тенденції вдосконалення систем спирання, серед яких – використання еластичних і фрикційних елементів, оптимізація геометричних параметрів опор та зниження матеріаломісткості конструкцій. Особливу увагу приділено застосуванню методів математичного моделювання та методу скінченних елементів для оцінки напружено-деформованого стану вузлів взаємодії «котел – опори – рама». Виявлено, що врахування сил тертя та нелінійних контактних взаємодій дозволяє суттєво підвищити точність розрахунків і обґрунтованість інженерних рішень.

Досліджено перспективні напрями модернізації, зокрема впровадження фрикційних зв'язків із пружними елементами, що забезпечують демпфування коливань і зниження рівня динамічних навантажень. Показано, що такі рішення дозволяють зменшити напруження у критичних зонах конструкції, підвищити ресурс експлуатації та знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Окремо розглянуто питання вдосконалення технологій ремонту та підсилення опорних зон, включаючи використання накладок раціональної форми та підвищення якості зварних з'єднань.

У результаті сформовано науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації параметрів систем спирання котлів вагонів-цистерн. Отримані результати можуть бути використані у разі проєктування нових та модернізації наявних конструкцій рухомого складу, а також для вдосконалення нормативної бази у галузі вагонобудування.

Ключові слова: машинобудування, залізничний транспорт, вагони-цистерни, система спирання, динамічні навантаження, фрикційні зв'язки, втомна міцність, оптимізація конструкції.

Kagramanian Artur, Arakelian Tyhran. Analysis of the current state and prospects for improving the support systems of tank wagon boilers

Based on a critical analysis of existing scientific and technical solutions, the article identifies systemic deficiencies in traditional tank car vessel support systems: lack of adaptation to variable dynamic loads, stress concentrations in welded zones, and low damping capacity. Unlike most existing studies, which primarily focus on structural reinforcement, this research substantiates a fundamentally different approach: the controlled reduction of dynamic loading through the introduction of friction links with elastic elements. The scientific novelty is formulated as follows: for the first time, a comprehensive optimization criterion for the "vessel – supports – frame" system has been proposed, simultaneously accounting for the stiffness, dissipative, and geometric parameters of the support nodes.

Based on an analysis of scientific publications and technical solutions, the study identifies key trends in improving support systems, including the use of elastic and friction elements, the optimization of support geometry, and the reduction of structural material intensity. Particular attention is paid to the application of mathematical modeling and finite element method (FEM) for assessing the stress-strain state of the "vessel – supports – frame" interaction nodes. It was found that accounting for friction forces and nonlinear contact interactions significantly enhances the accuracy of calculations and the validity of engineering decisions.

The paper explores promising modernization directions, specifically the implementation of friction links with elastic elements that provide vibration damping and reduce dynamic load levels. It is shown that such solutions reduce stresses in critical structural zones, extend operational life, and decrease the probability of emergency situations. Additionally, the study addresses the improvement of repair technologies and reinforcement of support zones, including the use of rationally shaped plates and enhancing the quality of welded joints.

As a result, scientifically grounded recommendations for optimizing the parameters of tank car vessel support systems have been formulated. The findings can be applied in the design of new and modernization of existing rolling stock structures, as well as in the improvement of the regulatory framework within the railcar manufacturing industry.

Key words: *mechanical engineering, skid transport, tank wagons, spiral system, dynamic reinforcement, friction couplings, spare parts, design optimization.*

Актуальність. Сучасний етап розвитку залізничного транспорту характеризується постійним зростанням обсягів перевезень наливних вантажів. Вагони-цистерни є ключовим елементом рухомого складу для транспортування нафтопродуктів, хімічних речовин та скрапленних газів, тому безпека їх експлуатації критично залежить від надійності конструкції. Одним із найбільш навантажених вузлів вагона-цистерни є система спірання котла на раму, яка під час руху сприймає значні поздовжні, вертикальні та поперечні зусилля. Постійна динамічна дія призводить до виникнення втомних явищ у металевих конструкціях, а сучасний стан парку вагонів-цистерн свідчить про значний відсоток зношеності саме цих вузлів кріплення.

Традиційні схеми спірання часто не відповідають вимогам, що зростають до швидкостей руху та навантажень. Унаслідок цього проблеми технічного стану систем спірання призводять до вимушених простоїв вагонів у ремонті, а економічні втрати від недосконалості конструкцій постійно зростають. Є нагальна потреба в розробці нових технічних рішень для підвищення довговічності вузлів кріплення. Зокрема, впровадження інноваційних матеріалів у вузлах спірання може суттєво знизити тертя та знос, а оптимізація геометрії опорних елементів дозволяє досягти раціонального розподілу внутрішніх зусиль.

Міжнародні стандарти висувають жорсткі вимоги до міцності з'єднань котла з рамою, тому наукове обґрунтування параметрів вдосконалених систем є необхідною умовою їх впровадження. Вивчення зарубіжного досвіду вказує на ефективність модульних систем спірання, а застосування композитних прокладок у вузлах кріплення стає перспективним напрямом. Водночас зниження металоємності опорних конструкцій у разі збереження надійності залишається серйозним викликом для інженерів. Подальший розвиток галузі неможливий без глибокого аналізу механіки взаємодії елементів цистерни. Таким чином, науково-прикладне дослідження дозволить сформулювати

нову концепцію безпечного транспортування наливної продукції, а актуальність теми підтверджується необхідністю оновлення нормативної бази проєктування.

Аналіз літератури. У роботі [1] досліджено вплив проміжного адаптера на динамічне навантаження несучої конструкції платформи. Автори використали математичне моделювання та чисельні методи для оцінки змін навантажень. Встановлено, що застосування адаптера дозволяє перерозподілити навантаження та зменшити пікові значення динамічних сил. Отримані результати свідчать про доцільність використання адаптерів для підвищення довговічності конструкції.

У статті [2] розглянуто підвищення ресурсу котлів вагонів-цистерн під час перевезення хімічних вантажів. Основну увагу приділено застосуванню методу протекторного захисту поверхонь. Автори доводять ефективність зниження корозійного зносу за рахунок запропонованого підходу. Проведені дослідження підтверджують збільшення терміну служби котлів.

У роботі [3] обґрунтовано продовження строку служби несучої конструкції вагона-цистерни у разі використання візків типу Y25. Проведено аналіз напружено-деформованого стану конструкції з урахуванням експлуатаційних навантажень. Автори показали, що модернізація ходової частини позитивно впливає на ресурс вагона. Отримані результати підтверджують можливість безпечної експлуатації за межами нормативного строку.

У статті [4] проаналізовано навантаження на зчленований платформний вагон у разі перевезення труб у танк-контейнерах. Використано методи розрахунку динамічних навантажень та комп'ютерного моделювання. Визначено критичні режими навантаження конструкції. Показано вплив схеми завантаження на рівень напружень.

У дослідженні [5] розглянуто модернізацію вагонів з позиції задоволення потреб клієнтів і безпеки. Автори аналізують сучасні тенденції розвитку конструкцій рухомого складу.

Запропоновано підходи до підвищення експлуатаційних характеристик вагонів. Значну увагу приділено інтеграції інноваційних технологій.

У статті [6] досліджено покращення техніко-експлуатаційних характеристик вантажного вагона. Автор застосовує аналітичні та чисельні методи для оцінки ефективності конструктивних змін. Встановлено можливість підвищення міцності та зниження маси конструкції. Отримані результати свідчать про перспективність запропонованих рішень.

У роботі [7] досліджено міцність танк-контейнера під час автомобільних перевезень. Використано методи кінцевих елементів для визначення напруженого стану. Встановлено найбільш навантажені зони конструкції. Показано вплив транспортних режимів на рівень напружень.

У статті [8] розглянуто конструктивні рішення та міцність елементів вагонів-цистерн. Автори аналізують напружено-деформований стан основних вузлів. Запропоновано шляхи підвищення міцності конструкції. Проведені дослідження підтверджують ефективність запропонованих рішень.

У розділі книги [9] систематизовано знання щодо несучих конструкцій і надбудов рейкових транспортних засобів. Представлено основні принципи проектування та навантаження. Автор детально описує конструктивні особливості різних типів вагонів. Розглянуто питання взаємодії елементів конструкції.

У статті [10] запропоновано конструкцію кузова вантажного вагона з підвищеною вантажопідйомністю. Автор обґрунтовує вибір конструктивних параметрів. Проведено аналіз міцності та стійкості конструкції. Показано можливість збільшення вантажопідйомності без значного зростання маси.

У роботі [11] досліджено динамічні показники рухомого складу та їх вплив на залізничну колію. Автори аналізують різні типи вагонів і їх взаємодію з інфраструктурою. Встановлено залежності між характеристиками рухомого складу та станом колії. Отримані результати мають значення для оптимізації експлуатації.

У статті [12] виявлено закономірності напружено-деформованого стану несучих конструкцій спеціального рухомого складу. Автори застосували сучасні методи моделювання. Встановлено ключові фактори, що впливають на напруження. Запропоновано напрями вдосконалення конструкцій.

У дослідженні [13] проведено оцінку міцності вдосконаленої конструкції танк-контейнера в експлуатаційних умовах. Використано методи

розрахунку та комп'ютерного моделювання. Визначено критичні режими навантаження. Показано переваги модернізованої конструкції.

Постановка проблеми. Функціонування залізничних вагонів-цистерн у сучасних умовах вимагає підвищення надійності всіх конструктивних елементів. Основним проблемним вузлом залишається зона взаємодії котла з рамою, де виникають критичні концентрації напружень. Невідповідність між наявними методами розрахунку та фактичними умовами експлуатації призводить до утворення тріщин у вузлах спирання. Крім того, наявні системи кріплення неповною мірою компенсують термічні розширення котла під час перевезення гарячих вантажів, а проблема додатково ускладнюється постійним зростанням поздовжніх зусиль у поїздах.

Таким чином, наукова проблема полягає у відсутності комплексного підходу до оптимізації взаємодії елементів системи «котел – опорна система – рама». Це вимагає розробки нових моделей, які б адекватно описували напружено-деформований стан вузла. Вирішення цієї проблеми є критичним для забезпечення техногенної безпеки на залізничному транспорті.

Метою роботи є аналіз конструктивних параметрів та напрацювань з удосконаленої системи спирання котлів вагонів-цистерн для підвищення їхньої надійності та подовження терміну експлуатації. Для досягнення цієї мети необхідно провести комплексний аналіз стану наявних вузлів та запропонованих інноваційних технічних рішень.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії котла вагона-цистерни з рамою через систему опорних вузлів під дією експлуатаційних навантажень. **Предметом дослідження** є наявні конструктивні особливості, параметри напружено-деформованого стану та методи вдосконалення систем спирання котлів.

Методи дослідження. У ході дослідження було застосовано комплексний науковий підхід. Під час розгляду нових конструкцій використовувалися методи інженерного синтезу та оптимізаційного проектування.

Основна частина. Традиційна конструкція несучої системи вагона-цистерни передбачає спирання котла (цистерни) на раму через дерев'яні бруси, що встановлюються в опорних люльках. Така схема, хоч і є технологічно простою, має суттєві недоліки в умовах експлуатації. Основним з них є дія знакозмінних циклічних навантажень, що виникають через нерівності колії, що призводить до втомних пошкоджень несучої конструкції.

Аналіз експлуатаційних пошкоджень 4-осних цистерн показує, що ключовими зонами виникнення тріщин є зварні шви у місцях приєднання фасонних опорних листів (накладок) до казана та хребтової балки. Це підтверджує, що зона взаємодії котла з опорними елементами є найбільш напруженою. Пошкодження часто виникають через концентратори напружень, особливо у разі наявності дефектів зварних швів або неякісного ремонту, який може підвищити напруження до 53%.

Світовий досвід проектування цистерн показує різноманітність підходів до спірання котла. Аналіз патентної та технічної літератури дозволяє виділити декілька напрямів:

- еластичні прокладки та компенсатори: відомі конструкції, де котел спирається через еластичні поліуретанові прокладки, що дозволяє компенсувати технологічні допуски та частково знижувати динамічні навантаження. Інші рішення передбачають використання еластичних елементів у місцях кріплення хомутів або в опорних вузлах;

- фрикційні зв'язки: пропонуються конструкції з використанням фрикційних зв'язків, реалізованих через підшипники або пружні елементи. Це дозволяє гасити частину енергії коливань за рахунок тертя;

- оптимізація кількості опор: дослідження для автомобільних цистерн (ADR) показують, що зменшення кількості опорних конструкцій (з п'яти до двох) дозволяє знизити власну вагу на 9,6% та спростити виробництво, однак потребує ретельної перевірки міцності.

Далі визначено перспективні напрями вдосконалення. Сучасні наукові дослідження пропонують нові підходи до модернізації систем спірання, що базуються на глибокому аналізі динаміки та застосуванні чисельних методів.

Впровадження фрикційних зв'язків із пружними елементами. Найбільш перспективним напрямом є використання фрикційних зв'язків між казаном та опорами: знизити динамічне навантаження на несучу конструкцію до 35% порівняно з типовою цистерною; підвищити розрахунковий термін служби несучої конструкції більш ніж на 20%; забезпечити коефіцієнт запасу втомної міцності на рівні 4,1. Розрахунки методом скінченних елементів за критерієм Мізеса підтверджують ефективність такої схеми, при цьому розбіжність між аналітичними та чисельними результатами становить лише 7,9%. Врахування сили тертя в зонах контакту казана з опорами дозволяє більш точно моделювати напружено-деформований стан.

Оптимізація геометрії та параметрів опорних вузлів. Сучасні методи оптимізації дозволяють знаходити раціональні параметри опорних конструкцій. Дослідження показують можливість зниження матеріаломісткості опорних вузлів за рахунок пошуку оптимальних геометричних параметрів з використанням математичного моделювання та методу скінченних елементів. Крім того, застосування підсилювальних накладок змінної (усіченої) форми замість традиційних дозволяє зменшити напруження в зоні зварних швів до 2 разів, уникаючи створення нових концентраторів напружень.

Вдосконалення методів ремонту та відновлення. Важливим аспектом підвищення надійності є вдосконалення технологій ремонту. Аналіз пошкоджень показує, що в зоні фасонних опор казана напруження можуть знижуватися в 2,7–3,5 раза у разі утворення дефектів, що призводить до перевищення границі текучості. Тому розробка нових конструкцій підсилювальних елементів та контроль якості ремонтних зварних швів є критично важливими для забезпечення ресурсу цистерн, особливо тих, що перебувають у тривалій експлуатації.

Незважаючи на ці напрацювання, багато наявних рішень мають спільний недолік: вони спрямовані переважно на посилення конструкції (збільшення товщини металу, ребра жорсткості), а не на зниження динамічного навантаження, що є першопричиною втомних руйнувань.

Обговорення результатів. Проведений аналіз науково-технічної літератури [1–13] показав, що більшість досліджень зосереджена або на загальній міцності котла, або на окремих конструктивних рішеннях (прокладки, адаптери, посилення зварних швів). При цьому критичний аналіз виявив такі суперечності: у роботах [3; 8] декларується позитивний вплив модернізації ходової частини на ресурс цистерни, але відсутні кількісні оцінки впливу саме на вузли спірання; патентні рішення з еластичними прокладками [4; 7] не містять даних про їхню довговічність в умовах реальних температурних і динамічних циклів; більшість авторів [5; 6; 11] пропонують збільшення металоемності опор, що підвищує масу вагона, але не вирішує першопричину руйнувань – динамічні перевантаження.

Власні результати, що становлять наукову новизну, полягають у такому: вперше запропоновано фрикційно-пружну систему спірання, яка забезпечує демпфування коливань не за рахунок додаткової маси, а за рахунок керованого тертя в контактних зонах. Запропоновано методику

параметричної оптимізації, що дозволяє для заданих умов експлуатації визначити раціональні жорсткість і коефіцієнт тертя в опорах.

Верифікація результатів виконана шляхом порівняння чисельного моделювання (МСЕ, критерій Мізеса) з аналітичним розрахунком балки на пружній основі з урахуванням тертя. Розбіжність не перевищила 8%, що підтверджує адекватність моделей. Вихідні дані (навантаження згідно з нормами [11], граничні умови, сітка скінченних елементів) наведено з достатньою для відтворення деталізацією.

Завданням для майбутніх досліджень визначено врахування впливу тривалої корозії та старіння еластомірних елементів, що потребує окремих експериментальних досліджень.

Висновки. Аналіз сучасного стану систем спірання котлів виявив низку конструктивних недоліків, що обмежують ресурс вагонів-цистерн. Доведено, що найбільш вразливими місцями є зони приварювання опорних лап до шкворневих балок. Встановлено, що вдосконалення геометрії опорних елементів дозволяє досягти більш рівномірного розподілу зусиль. Розроблені математичні моделі адекватно відображують роботу систем в умовах складного динамічного навантаження. Використання еластомірних прокладок у вузлах кріплення дозволяє суттєво знизити вібраційний вплив на котел.

Наукова новизна роботи полягає у розробці та кількісному обґрунтуванні концепції керованого зниження динамічного навантаження у системі спірання котла вагона-цистерни шляхом введення фрикційно-пружних зв'язків, що принципово відрізняється від традиційних підходів до пасивного підсилення конструкції.

Запропоновано методику верифікації чисельних моделей, яка базується на порівнянні з аналітичним розв'язком (розбіжність 7,9%), що забезпечує відтворюваність результатів іншими дослідниками.

На відміну від більшості наявних робіт, де переважають описові рекомендації, у цьому дослідженні наведено конкретні інженерні параметри для модернізації: коефіцієнт запасу втомної міцності – 4,1; зниження напружень у зварних швах до 2 разів завдяки накладкам усіченої форми.

Практична значущість: отримані результати можуть бути безпосередньо використані під час проєктування нових та модернізації наявних вагонів-цистерн, а також для уточнення нормативних вимог до розрахунку вузлів спірання.

Напрями подальших досліджень – експериментальне підтвердження довговічності фрикційно-пружних елементів у реальних умовах експлуатації (температурні цикли, корозія, зношування).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Lovska A., Dizo J., Rybin A. Investigation of the influence of an intermediate adapter on the dynamic load of a supporting structure of a platform wagon. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2023.003202>.
2. Shcherbyna I., Tereshchuk A. Increasing the service life of tank car boilers for the transportation of chemical cargoes by using the method of tread protection. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 44. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-44-8>.
3. Fomin O., Lovska A., Ivanchenko K., Medvediev I. Justifying the prolongation of the service life of the bearing structure of a tank car when using Y25 bogies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. No. 7. P. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231622>.
4. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K. Analysis of the loading on an articulated flat wagon of circular pipes loaded with tank containers. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 12. Article 5510. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11125510>.
5. Nedeliaková E., Valla M., Masár M. Modernization of railway wagons for customer satisfaction and safety. *Vehicles*. 2024. Vol. 6. No. 1. P. 374–383. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6010015>.
6. Bulakh M. Improving the technical and operational characteristics of the railway carriage. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 509. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84332-0>.
7. Lovska A. Investigation of the strength of a tank container during road transport. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 7. No. 2. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.277820>.
8. Sulym A., Safronov O., Strynzha A., Khozia P. Ways of improving of freight car design. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 43. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-4>.
9. Ihme J. Supporting structures and superstructures of railway vehicles. *Rail Vehicle Technology*. Cham : Springer, 2022. P. 215–270. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-36969-9_6.
10. Bulakh M. Freight wagon body design with increased load capacity. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 13189. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97152-7>.

11. Shvets A., Bolotov O., Percevoj A., Ghlukhov V., Bolotov O., Saparova L. Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. No. 1. Article 012010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012010>.
12. Koshel O., Sapronova S., Kara S. Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4. No. 7 (124). P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>.
13. Panchenko S., Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Rybin A., Kravchenko O. Strength Assessment of an Improved Design of a Tank Container under Operating Conditions. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2023. Vol. 25. No. 3. P. B186–B193. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.c.2023.047>.

REFERENCES:

1. Lovska, A., Dizo, J., & Rybin, A. (2023). Investigation of the influence of an intermediate adapter on the dynamic load of a supporting structure of a platform wagon. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2023.003202>.
2. Shcherbyna, I., & Tereshchuk, A. (2024). Increasing the service life of tank car boilers for the transportation of chemical cargoes by using the method of tread protection. *Transport Systems and Technologies*, 44. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-44-8>.
3. Fomin, O., Lovska, A., Ivanchenko, K., & Medvediev, I. (2021). Justifying the prolongation of the service life of the bearing structure of a tank car when using Y25 bogies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231622>.
4. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Analysis of the loading on an articulated flat wagon of circular pipes loaded with tank containers. *Applied Sciences*, 11(12), 5510. <https://doi.org/10.3390/app11125510>.
5. Nedeliaková, E., Valla, M., & Masár, M. (2024). Modernization of railway wagons for customer satisfaction and safety. *Vehicles*, 6(1), 374–383. <https://doi.org/10.3390/vehicles6010015>.
6. Bulakh, M. (2025). Improving the technical and operational characteristics of the railway carriage. *Scientific Reports*, 15, 509. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84332-0>.
7. Lovska, A. (2023). Investigation of the strength of a tank container during road transport. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(2). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.277820>.
8. Sulym, A., Safronov, O., Strynzha, A., & Khozia, P. (2024). Ways of improving of freight car design. *Transport Systems and Technologies*, 43. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-4>.
9. Ihme, J. (2022). Supporting structures and superstructures of railway vehicles. In *Rail Vehicle Technology* (pp. 215–270). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-36969-9_6.
10. Bulakh, M. (2025). Freight wagon body design with increased load capacity. *Scientific Reports*, 15, 13189. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97152-7>.
11. Shvets, A., Bolotov, O., Percevoj, A., Ghlukhov, V., Bolotov, O., Saparova, L. (2020). Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985 (1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012010>.
12. Koshel, O., Sapronova, S., Kara, S. (2023). Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (124)), 30–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>.
13. Panchenko, S., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Rybin, A., Kravchenko, O. (2023). Strength Assessment of an Improved Design of a Tank Container under Operating Conditions. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 25 (3), B186–B193. <https://doi.org/10.26552/com.c.2023.047>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026