

В. Г. Равлюк

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 095-444-59-74, E-mail: ravvg@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

А. О. Ловська

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 066-338-19-46, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

Д. І. Скуріхін

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 093-847-46-78, E-mail: skurikhin@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3746-5157>

А. В. Рибін

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 066-705-32-61, E-mail: rybinandrey@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4430-8018>

М. Г. Равлюк

Український державний університет залізничного транспорту
м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна
Телефон: 068-064-52-19, E-mail: ravmg@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6021-660X>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЛЬМОВОЇ СИСТЕМИ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА НА БЕЗПЕКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

У статті висвітлено аналіз роботи гальмової системи вантажних вагонів, зокрема взаємодії гальмових колодок із поверхнею кочення коліс. Розглянуто конструкцію тріангеля, маятникових підвісок та важільної передачі, які забезпечують притискання та відведення колодок під час гальмування. Виявлено, що нерівномірний розподіл сили натиснення колодок на колеса зумовлений конструктивними особливостями гальмової системи, зокрема розташуванням отвору для вертикального важеля в розпірці тріангеля. Це призводить до утворення шкідливого крутного моменту, який спричиняє нахил колодок і нерівномірний їх знос.

© Равлюк В.Г., Ловська А.О., Скуріхін Д.І., Рибін А.В., Равлюк М.Г., 2025

Проведено комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження, які підтвердили, що тріангель у зібраному стані є врівноваженим, але під дією зовнішніх сил може порушуватися його рівновага. Досліджено процеси кінематики колодок на маятникових підвісках, що забезпечує їх відведення від колеса під час попуску гальм. Встановлено, що через конструктивні особливості утворюються нерівномірні зазори між колодками та колесами, що призводить до часткового тертя та зносу верхніх кінців колодок у режимі тяги та вибігу вантажного поїзда.

Запропоновано класифікацію факторів, які впливають на розподіл сили натиснення колодок, включаючи конструктивні, технічні, динамічні, зовнішні, екологічні та технологічні аспекти. На підставі аналізу цих факторів обґрунтовано необхідність розробки комплексного підходу для оптимізації гальмової системи, що дозволить забезпечити рівномірний розподіл сили натиснення, знизити знос елементів гальмової системи та підвищити ефективність і безпеку гальмування вантажного рухомого складу.

Ключові слова: безпека руху, гальмова система, кінематика колодок, тріангель, гальмові колодки, транспортна механіка.

Вступ та постановка проблеми. Підвищення ефективності експлуатації рухомого складу вимагає впровадження інноваційних підходів, спрямованих на створення якісно нових конструкцій вагонів, які характеризуються високою надійністю, економічністю в експлуатації та технічному утриманні [1–5]. Це є ключовим елементом для забезпечення конкурентоспроможності залізничного транспорту в умовах сучасних викликів, пов'язаних із зростанням вимог до якості перевезень, безпеки руху та екологічності.

Процес гальмування вантажного поїзда – це явище, яке описується із використанням мультидисциплінарного підходу та характеризує взаємодію різноманітних вузлів гальмової системи, спрямовану на оптимальне уповільнення та зупинку рухомого складу. Ефективність гальмових систем і їх надійна експлуатація мають вирішальне значення для зниження ризиків під час транспортування вантажів, враховуючи високі вимоги до безпеки та стабільності руху на залізничному транспорті [6]. Тому, сучасні тенденції в галузі залізничного транспорту зумовлюють посилення вимог до систем гальмування, підкреслюючи необхідність їх постійної модернізації та вдосконалення.

Недосконалість конструкції гальмової важільної передачі (ГВП) візків вантажних вагонів має значний вплив на ефективність процесу гальмування. Під час руху поїзда в режимі тяги та вибігу гальмові колодки нахиляються і торкаються своїми верхніми кінцями до поверхонь кочення коліс (рис. 1, а). За таких умов створюються небажане тертя, що спричиняє ненормативний знос колодок (рис. 1, б). Це не тільки призводить до збільшення експлуатаційних витрат на утримання вагонів, але й до збільшення опору руху поїзда, який споживає додаткові енергоресурси. Крім того, відсутність зазору у верхній частині між колодкою й колесом призводить до зменшення робочої площі колодок, а це знижує ефективність гальмування поїзда. За такої умови відбувається підвищення температури поверхонь триботехнічних пар «гальмова колодка – колесо», а це спричиняє появу високотемпературних пошкоджень коліс (рис. 1, в). Такі пошкодження можуть включати мікротріщини, вищербини та зсуви металу, які значно скорочують термін служби колісних пар і збільшують витрати на їх обслуговування та заміну.

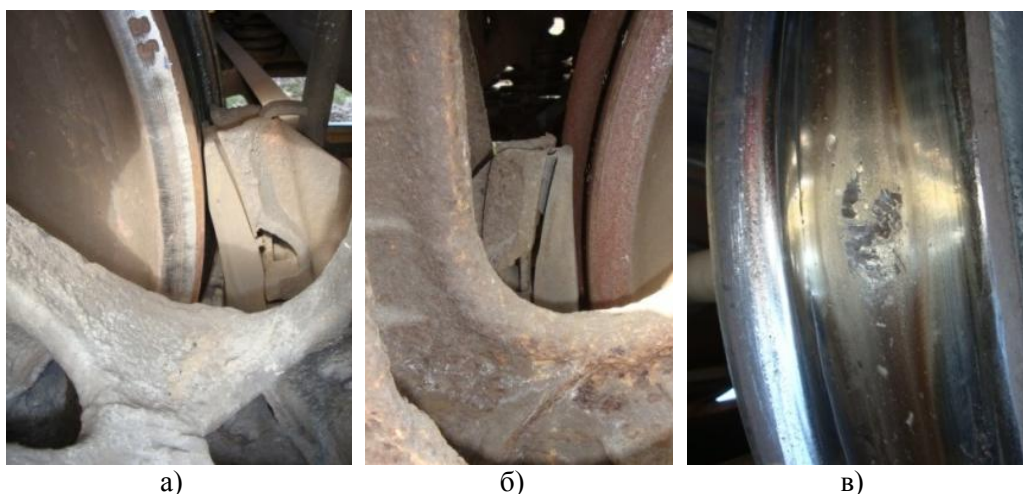


Рис. 1. Вигляд непрацездатних елементів триботехнічного вузла «гальмова колодка – колесо» в експлуатації через конструкційні особливості ГВП

(а) – відсутній зазор між колодкою і колесом під час попущених гальм;
(б) – клинодуальний знос колодки; (в) – високотемпературні пошкодження на поверхні колеса

Отже, існує необхідність у модернізації конструкції важільної передачі гальмових систем вантажних вагонів. Це забезпечить підвищення рівня безпеки руху, зменшення експлуатаційних витрат та оптимізацію функціонування залізничної інфраструктури. Впровадження інноваційних рішень у цій галузі є ключовим фактором для забезпечення ефективності та конкурентоспроможності залізничного транспорту.

Аналіз існуючих досліджень. У багатьох наукових дослідженнях, які зосереджені на застосуванні композиційних гальмових колодок в рухомому складі, наголошено акцент переважно на аспекти, пов'язані з безпекою руху та впливом їх на навколишнє середовище. З метою зниження експлуатаційних витрат у залізничній галузі, гальмові колодки часто сприймаються як товар, що закуповується за мінімальною ціною при їх задовільній роботі [7]. Проте, такий підхід може не забезпечувати найменші експлуатаційні витрати в довгостроковій перспективі. Вибір матеріалу для фрикційних компонентів колодок має безпосередній вплив на тривалість нормативного строку служби колісної пари, заміна якої, як правило, значно перевищує вартість елементів ГВП вагона. Таким чином, економічну вигоду від низької початкової ціни колодок можна вважати не обґрунтованою через підвищені витрати на подальше технічне обслуговування та ремонт рухомого складу.

У науковій роботі [8], базуючись на аналізі опублікованих матеріалів, авторами наведено порівняльні показники якості та експлуатаційні характеристики чавунних гальмових колодок, виготовлених методом лиття та композиційних колодок. У роботі виділено декілька недоліків застосування композиційних колодок, зокрема їх низька теплопровідність, яка спричиняє термічні пошкодження на поверхнях кочення коліс рухомого складу. Це в свою чергу призводить до зростання експлуатаційних витрат, які пов'язані з ремонтом колісних пар. Інший значний недолік полягає у відсутності в нормативних документах на виготовлення хімічного складу речовин, які входять до композиційної суміші. А це порушує чинне законодавство України і ускладнює контроль за цими речовинами. Однак, автори не згадують про витрати, спричинені ненормативним зносом композиційних гальмових колодок, що

виникає в умовах експлуатації вантажного рухомого складу без активного гальмування.

У праці [9] проведено аналіз різноманітних гальмових систем, зокрема тих, які використовуються у триботехнічних парах «колодка – колесо». Авторами наведено переваги дискових гальм і доцільність їх застосування зі звичайними триботехнічними парами. Основною проблемою композиційних гальмових колодок, які застосовуються у вантажних вагонах, є їх негативний вплив на поверхню кочення колісних пар. У зв'язку з низькою теплопровідністю колодок в зоні контакту з колесами виникають високі температури, що спричиняє утворення різноманітних дефектів на поверхні коліс.

У дослідженні [10] запропоновано науковий підхід для оцінки результатів натурних досліджень ефективності гальмової системи вантажних вагонів. Автор розглядає процеси гальмування з використанням методів комп'ютерного моделювання, пропонуючи застосування інформаційної моделі у вигляді диференціального рівняння руху вагона. Сформовані математичні моделі дозволяють визначати характеристики гальмової системи та оцінювати гальмову ефективність поїзда. Однак, у дослідженні не враховано вплив коефіцієнта клинодуальності композиційних колодок, що є суттєвим фактором для оцінки дійсного гальмового шляху вантажного поїзда. Крім того, конструктивні особливості гальмової передачі, зокрема нерівномірний розподіл сили натиснення колодок на колеса, можуть призводити до зниження ефективності гальмування та збільшення зносу елементів гальмової системи. Цей недолік потребує подальшого дослідження для удосконалення методів розрахунку та підвищення надійності гальмової системи вантажних вагонів.

Аналіз науково-технічних та науково-популярних джерел інформації про працездатність ГВП вагонів підтверджує, що існуючі конструкції гальмових систем візків, описані в працях [11–13], не вирішують повністю проблеми ненормативного зносу колодок під час попусків гальм. Встановлено, що розробники цих систем зосереджувалися на створенні допоміжних пристроїв для протидії зусиллям, які впливають на положення колодок, виходячи з кінетостатичного аналізу механізму ГВП [14]. Це вказує на те, що необхідно застосовувати комплексний підхід під час проєктування та оптимізації гальмових систем. При цьому слід враховувати динамічні та реальні експлуатаційні аспекти їх функціонування, а також зосередити увагу на зусиллях, які виникають у елементах триангельних важільних передач візків під час гальмування.

У науковій праці [15] здійснено аналіз експлуатаційних показників якості чавунних та композиційних гальмових колодок, які використовуються у пасажирському та вантажному рухомому складі. Авторами розглянуто ряд негативних аспектів від застосування композиційних колодок, зокрема їх вплив на навколишнє середовище. Окрім того, описано процеси, які призводять до пошкоджень коліс транспортних засобів, що обумовлено механічними властивостями матеріалів з яких виготовляють колодки. Це дослідження спрямоване на виявлення причинно-наслідкових зв'язків між різними типами гальмових колодок. Наведено вплив особливостей колодок на екологічне забруднення, підвищення довговічності й безпеку залізничного транспорту.

У дослідженні [16] вказано, що більшість міжнародних науковців фокусується на вирішенні проблемних питань стосовно дискових гальм. Вони аналізують міцність їх деталей, контролюють експлуатаційні параметри, визначають температурний режим окремих триботехнічних вузлів гальмових систем рухомого складу. Це свідчить про глобальну тенденцію до оптимізації гальмових систем з метою підви-

щення їх ефективності та надійності, зниження зносу і поліпшення загальних експлуатаційних характеристик рухомого складу.

У дослідженнях [17, 18], зосереджено увагу на застосуванні сучасних матеріалів для розробки нових конструкцій триботехнічних систем. Доведено ефективність цих інновацій у контексті сучасного рухомого складу. Завдяки таким нововведенням можна досягнути збільшення швидкості руху та осьового навантаження, а також підвищення ефективності гальмової системи рухомого складу. Однак, у наведених дослідженнях не приділялося належної уваги проблемам, пов'язаних з ненормативним зносом гальмових колодок у вантажному рухомому складі. Тому доцільно було б виконати аналіз факторів, що впливають на працездатність конструкцій триботехнічних систем з метою підвищення їх зносостійкості та врахування сучасних матеріалів за умов їх виготовлення.

Наведений літературний аналіз [7–18] дозволяє сформулювати висновок про актуальність проблеми ненормативного зносу колодок, що використовуються у гальмових системах візків вагонів. Це питання є важливим для забезпечення надійності та безпеки залізничних перевезень і зумовлює необхідність його подальшого дослідження та розвитку.

Метою роботи є дослідження впливу конструктивних параметрів гальмової системи вантажного вагона на безпеку експлуатації залізничного рухомого складу.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- дослідити процес утворення ненормативного зносу колодок у ГВП і встановити причини його виникнення;
- проаналізувати систему маятникового підвішування триангеля й визначити нормативні величини зазорів між колодкою і колесом під час попуску гальм;
- виконати аналіз факторів, що впливають на розподіл сили натиску між гальмовими колодками та колесами.

Матеріали та результати досліджень. У парку вантажних вагонів на мережі залізниць застосовуються типові ГВП, які включають триангелі з додатковими конструктивними елементами, врівноважено закріплені на бокових рамах візків. Конструктивне виконання ГВП з використанням триангелів забезпечує рівномірне відведення гальмових колодок від поверхонь кочення коліс у стані попущеного гальма, а також їх стабільне утримання на нормативній відстані під час руху поїзда. Це є ключовим фактором для забезпечення довговічної та безвідмовної роботи гальмових пристроїв, а також для дотримання нормативних показників зносу елементів ГВП. Крім того, така конструкція сприяє зниженню динамічних навантажень на елементи системи, що позитивно впливає на їх ресурс експлуатації. Оптимізація роботи ГВП також дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування та ремонт, що є важливим аспектом для підвищення економічної ефективності залізничних перевезень [19, 20].

Важливим елементом типової ГВП є триангелі, які забезпечують не лише стабільність, а й функціональність системи. У типовій ГВП до цапф триангелів, розташованих на його кінцях, жорстко приєднані башмаки з колодками. Ця жорстка конструкція шарнірно підвішується на дві маятникові підвіски у візку. За умови відхилення яких гравітаційними силами забезпечується підведення й притиснення колодок до поверхні кочення коліс для гальмування й відведення колодок від коліс під час попуску гальм. У такому стані у візку триангелі шарнірно спираються на маятникові підвіски, у рівновазі утримуються горизонтально й забезпечують необхідні зазори між гальмовими колодками та колесами. З приєднанням вертикального важеля до отвору у розпірці триангеля рівновага порушується, триангель нахиляється

до спирання верхніми кінцями колодок на поверхні кочення коліс. Схиляння колодки до спирання верхнім кінцем на колесо зумовлено наявністю відстані l_1 . Під дією сили $P+P_{дин}$ на плече l_1 з'являється шкідливо діючий крутний момент $M_{кр}$ (рис. 2) [21].

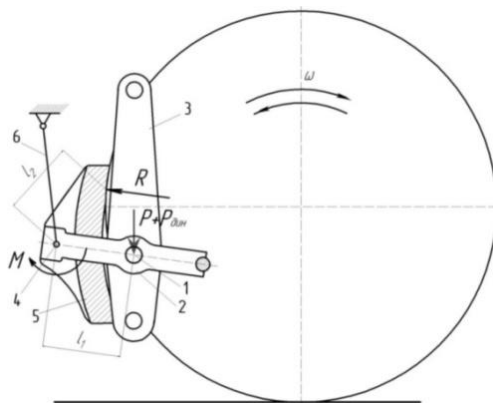


Рис. 2. Розрахункова схема колодки під час її взаємодії з колесом

1 – шарнір з'єднання вертикального важеля з розпівкою триангеля; 2 – розпівка триангеля; 3 – вертикальний важіль; 4 – шарнір підвішування башмака; 5 – гальмова колодка; 6 – маятникова підвіска; R – сила реакції від спирання колодки на колесо; l_1 – відстань від центра отвору у розпівці триангеля до шарніра підвішування башмака; l_2 – плече дії сили реакції R до центра підвішування башмака на маятниковій підвісці

Причиною нахилу колодок до спирання на поверхні кочення колісних пар у візку стає те, що отвір для приєднання вертикального важеля у розпівках триангелів розташований на боці струни. Відстань l_1 від центра отвору у розпівці до умовної осі підвішування триангеля на маятникових підвісках утворює шкідливо діючий крутний момент $M_{кр}$ (рис. 2), який визначається за такою формулою:

$$M_{кр} = (P + P_{дин}) \cdot l_1, \quad (1)$$

де $P+P_{дин}$ – сила, зумовлена навантаженням триангеля вагою вертикального важеля і приєднаних до нього деталей у попущеному стані гальма, Н.

Залежність (1) вказує на те, що шкідливо діючий крутний момент $M_{кр}$ утворюється наявністю відстані l_1 від центра отвору у розпівці триангеля до умовної осі підвішування триангеля на маятникових підвісках.

На врівноважений триангель діє сила $P+P_{дин}$ від ваги приєданого до його розпівки вертикального важеля з верхньою тягою й нижньою затяжкою вертикальних важелів. Під дією сил $P+P_{дин}$ на плече l_1 з'являється шкідливо діючий крутний момент сил $M_{кр}$, який нахилє триангель і колодки спираються верхнім кінцем на колеса [22]. Водночас триангель врівноважується силою реакції R , яка створюється від спирання пари гальмових колодок на поверхні кочення колісної пари.

На підставі схеми дії сил складемо рівняння моментів відносно шарнірів підвішування триангеля, маючи на увазі, що сила $P+P_{дин}$ діє на розпівку триангеля в його середній частині й розподіляється на дві гальмові колодки колісної пари

$$(P + P_{\text{дин}}) \cdot l_1 = 2R \cdot l_2, \quad (2)$$

звідси

$$R = \frac{(P + P_{\text{дин}}) \cdot l_1}{2l_2}, \quad (3)$$

де l_2 – плече дії реакції R до центра підвішування гальмової колодки, мм.

Із рівняння (2) видно, що сила $P + P_{\text{дин}}$ передається на колодки таким чином, що виникає нахил триангеля з притисканням верхніх кінців колодок до поверхонь кочення колісних пар. Через це відбувається стирання верхніх кінців колодок на довжині від 3 до 140 мм за попущених гальм. Це й спричиняє перерозподіл питомих сил натиснення колодки на колесо під час гальмування. На верхній частині колодки діють значно більші контактні натиснення, і знос її верхньої частини збільшується, що призводить до ненормативного зносу композиційних гальмових колодок [19].

Для визначення сил, які спричиняють нахил колодок проведено комп'ютерне моделювання врівноваженості одного триангеля (рис. 3). Триангель 1 розглянуто у зібраному стані з гальмовими колодками 2 на маятникових підвісках 3 [19, 23].

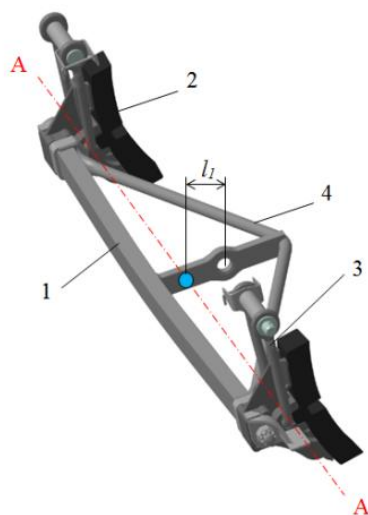


Рис. 3. Типовий триангель у зібраному стані

1 – швелерна балка триангеля; 2 – гальмова колодка; 3 – маятникова підвіска;
4 – струна; А-А умовна вісь підвішування

Теоретичну перевірку виконано математичним порівнянням суми моментів, що утворюються власною вагою деталей триангеля, розташованих на протилежних від осі (А-А) частинах. Водночас перевірялася й порівнювалася сума моментів на боці як балки триангеля ΣM_b , так і на боці струни ΣM_c .

У разі невірності конструкції триангеля сума моментів від ваги деталей на боці балки триангеля буде відрізняться від суми моментів на боці струни, тобто

$$\Sigma M_o \neq \Sigma M_c, \quad (4)$$

де ΣM_o – сума моментів від ваги частин триангеля, розташованих на боці балки триангеля відносно умовної осі (А-А) його підвішування на маятникових підвісках;

ΣM_c – сума моментів від ваги частин триангеля, розташованих на боці струни відносно осі (А-А).

Комп'ютерне моделювання й розрахунки, виконані за такої умови, показали, що триангель у зібраному стані з гальмовими колодками має врівноважену конструкцію відносно умовної осі (А-А).

Для підтвердження виконання умови врівноваженості було обстежено 348 триангелів, які встановлювались на маятникові підвіски візків після їх ремонту у вантажному вагонному депо регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця». Водночас визначалася можливість нахилу триангеля прикладеною силою на боці струни або на боці швелерної балки триангеля. В усіх перевірених триангелях не зафіксовано випадків перевішування й нахилу триангеля ні у бік балки, ні у бік струни. Така позитивна властивість конструкції триангеля дає змогу утримуватися йому на маятникових підвісках таким чином, що гальмові колодки не спираються ні верхніми, ні нижніми кінцями до поверхні кочення коліс.

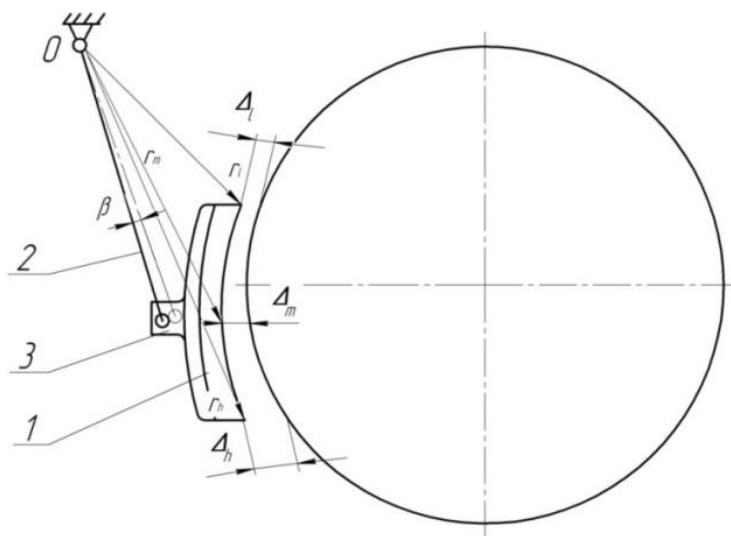


Рис. 4. Схема відведення гальмової колодки від колеса на маятниковій підвісці

1 – гальмова колодка; 2 – маятникова підвіска; 3 – башмак

Маятникове підвішування забезпечує коливальну рухомість гальмових колодок за рахунок повертання підвіски навколо її верхнього шарніра, закріпленого у спеціальному кронштейні бокової рами візка. Підвішування й утримування всієї ГВП у візку з колодками здійснюється на чотирьох маятникових підвісках. Верхні шарніри кожної маятничової підвіски приєднуються до кронштейнів бокових рам візка. Відхилення кожної маятничової підвіски в один або інший бік відносно верхнього шарніра забезпечує віддалення або наближення гальмової колодки відносно повер-

хні кочення колеса [24, 25].

Виконаний аналіз кінематики гальмової колодки, яка відходить від поверхні кочення колеса під час попуску гальм, показав, що маятникове підвішування колодок забезпечує не тільки поступальний рух колодки від колеса, але й обертальний щодо центра O (рис. 4). Якщо маятникова підвіска відхиляється на кут β , верхній кінець колодки, рухаючись по дузі малого радіуса r_l , відходить від поверхні кочення колеса на відстань Δ_l , а нижній – по дузі значно більшого радіуса r_h буде відходити від поверхні кочення колеса на значно більшу відстань Δ_h . Відстань Δ_m від колеса до колодки у середній частині буде дорівнювати середньому значенню радіуса r_m .

За малих величин кута відхилення маятничової підвіски α , що спостерігається в реальних умовах, величини таких проміжків можуть апроксимуватися з достатньою для практичних розрахунків точністю за такими аналітичними виразами:

– для верхнього кінця колодки

$$\Delta_l = r_l \cdot \sin \beta; \quad (5)$$

– для середньої частини колодки

$$\Delta_m = r_m \cdot \sin \beta; \quad (6)$$

– для нижнього кінця колодки

$$\Delta_h = r_h \cdot \sin \beta, \quad (7)$$

де r_l , r_m і r_h – радіуси траєкторій, якими здійснюється відхід відповідно верхньої, середньої й нижньої частин гальмової колодки стосовно твірної поверхні кочення колеса;

β – кут відхилення маятничової підвіски під час попуску гальма.

Наведене вище вказує на закономірність утворення нерівномірних зазорів між поверхнями тертя колодок і поверхнями кочення коліс за попущених гальм. Це зумовлено конструкцією вузла підвішування гальмових колодок на маятникових підвісках у важільній передачі візка [23].

Малий зазор Δ_l , що утворюється між верхнім кінцем колодки і колесом, та інтенсивні вимушені власні коливання цих частин візка вагона під час руху на великих швидкостях зумовлюють часткові торкання верхнього кінця колодки до поверхні кочення колеса, яке швидко обертається. Виникають часткові торкання різного характеру за тривалістю й силою притиснення верхнього кінця колодки до колеса. Від цього утворюється місцева стертість верхнього кінця колодки на робочій поверхні.

Під час гальмувань ця уже частково стерта верхня частина колодки не може притискатися до поверхні кочення колеса. Вона навпаки відходить від колеса. Через це під час гальмувань натиснення колодки на колесо і фрикційна їх взаємодія порушується. На верхній частині колодки інтенсивно зростає фрикційне стирання її робочої маси й різко підвищується температура від тертя, що негативно впливає на загальну ефективність гальмування та створює умови для високотемпературних пошкоджень поверхні кочення колеса [25].

Результати розрахунків величин зазорів, на які гальмова колодка під час попуску гальма віддаляється від твірної поверхні кочення колеса наведено на рис. 5.

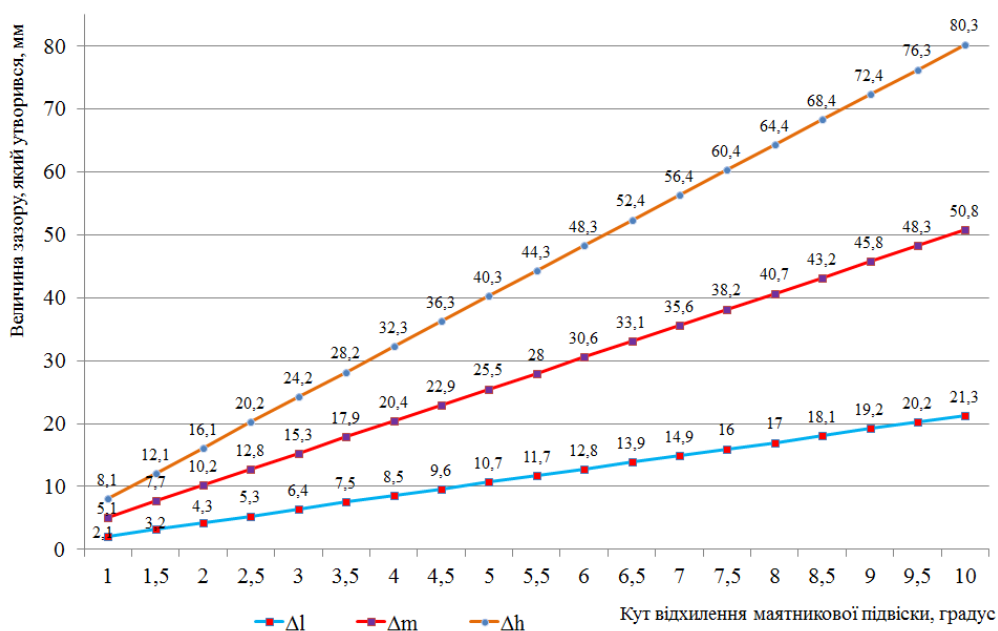


Рис. 5. Залежність величини зазору між колодкою та колесом від кута відхилення маятникової підвіски

Проаналізувавши графік, наведений на рис. 5, можна зробити висновок, що відрегулювати нормативний зазор між гальмовою колодкою та колесом у процесі експлуатації на тривалий час практично неможливо. Це пояснюється значним зносом кінтостатичних вузлів з'єднання елементів ГВП вагона [19, 24]. Внаслідок цього відбувається поступове порушення геометрії контакту, що негативно впливає на рівномірність гальмування та підвищує ризик передчасного виходу з ладу окремих елементів гальмової системи.

Дослідження закономірностей розташування гальмових колодок відносно поверхні кочення колісних пар вантажних вагонів засвідчили, що колодки можуть частково здійснювати шкідливе тертя по поверхнях кочення коліс навіть у режимі руху без гальмування. Це явище спричинене конструктивними особливостями ГВП, що призводить до нерівномірного розподілу сили натиснення колодок на колеса, спричиняє клинодуальний знос і зумовлює розвиток інших експлуатаційних факторів.

Таким чином, рівномірний розподіл сили натиснення композиційних гальмових колодок на колеса є ключовим аспектом ефективності та безпеки гальмової системи вагонів [26]. Він залежить від комплексу факторів, які можна класифікувати за їх природою: конструктивні, технічні, експлуатаційні, зовнішні, екологічні та технологічні. Детальний аналіз цих факторів дозволяє виявити основні причини нерівномірного розподілу сили натиснення та запропонувати шляхи їх усунення (рис. 6).

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

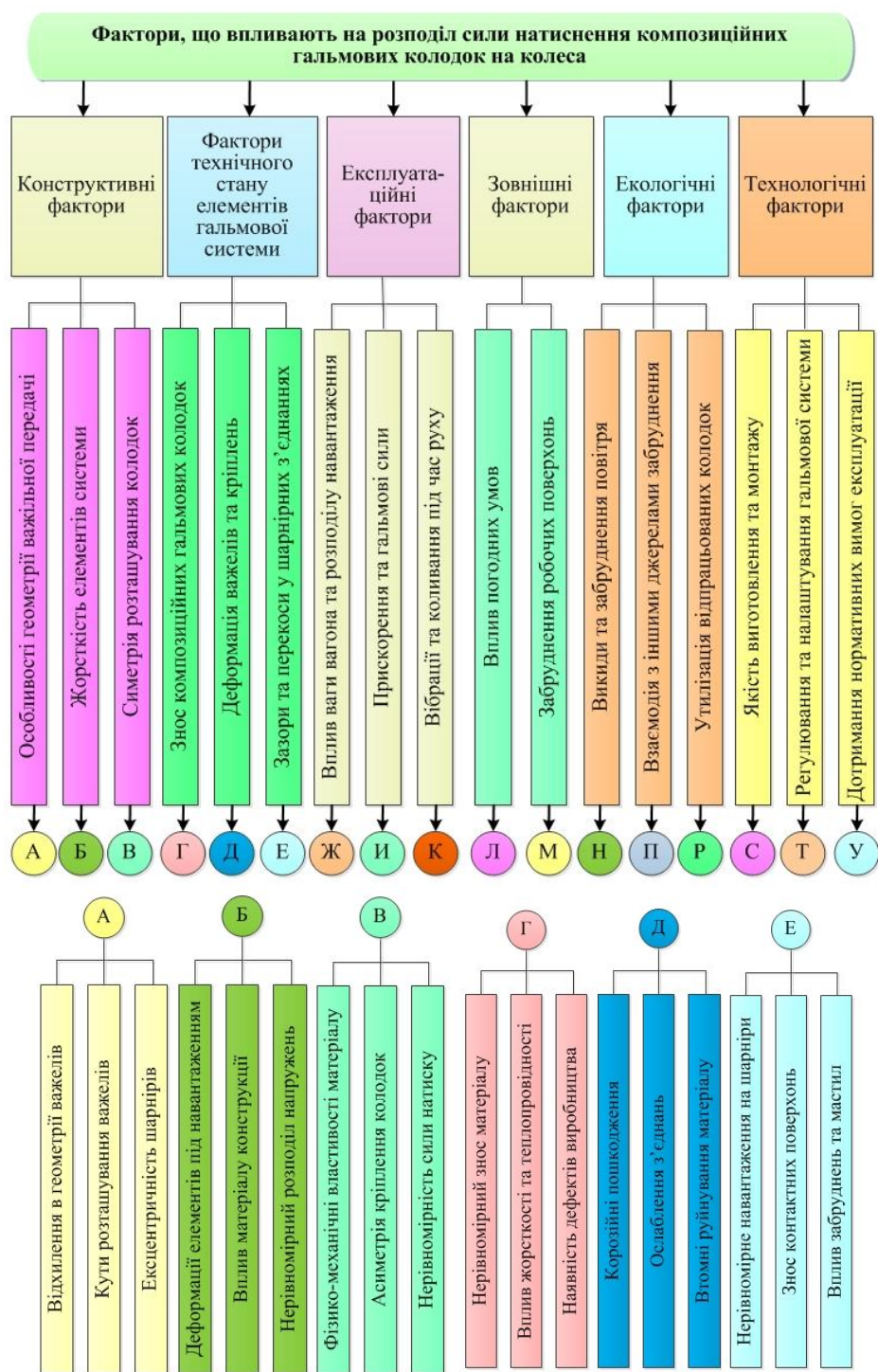


Рис. 6. Ієрархічна схема систематизації факторів, що визначають розподіл сили натиснення композиційних гальмових колодок на колеса

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



Рис. 6 (продовження). Ієрархічна схема систематизації факторів, що визначають розподіл сили натиснення композиційних гальмових колодок на колеса

Конструктивні фактори пов'язані з особливостями проектування та будови гальмової системи вагона. Вони включають геометрію важільної передачі, яка визначає, як сила передається від гальмового механізму до колодок. Наприклад, якщо важільна передача має неправильний кут нахилу, це може призводити до нерівномірного розподілу сили на колодки. Жорсткість елементів системи також відіграє важливу роль: якщо матеріали важелів недостатньо жорсткі, вони можуть деформуватися під навантаженням, що призводить до втрати ефективності гальмування. Симетрія розташування колодок є ще одним ключовим фактором, якщо одна колодка розташована ближче до колеса, ніж інша, це може призводити до нерівномірного зносу та зменшення ефективності гальмування [27].

Фактори технічного стану елементів гальмової системи вагона відображають стан елементів системи під час експлуатації. Знос композиційних гальмових колодок, особливо клинодуальний є одним із найважливіших факторів. Якщо колодки зношені на 50 %, це може призводити до зменшення тертя та збільшення гальмового шляху. Деформація важелів та кріплень також впливає на роботу системи, якщо важіль деформований, це може призводити до нерівномірного передавання сили на колодки. Зазори та перекося у шарнірних з'єднаннях є однією з проблем, якщо в шарнірному з'єднанні є зазор 2 мм і більше, то це може призводити до втрати енергії та зменшення ефективності гальмування рухомого складу.

Експлуатаційні фактори пов'язані з умовами руху вагона. Вплив ваги вагона та розподілу навантаження є ключовим, якщо вагон перевантажений з одного боку, це може призводити до нерівномірного тиску на колодки. Прискорення та гальмові сили також впливають на систему, якщо вагон різко гальмує, це може призводити до перевантаження передніх за напрямком руху поїзда колодок. Вібрації та коливання під час руху є ще одним важливим фактором, якщо вагон рухається по нерівній рейковій колії, це може призводити до послаблення кріплень та зміни розподілу сили.

Зовнішні фактори пов'язані з умовами навколишнього середовища. Вплив погодних умов є одним із найважливіших, якщо на вулиці дощ, це може призводити до зменшення тертя між колодками та колесами. Забруднення робочих поверхонь також впливає на ефективність гальмування, якщо на колодках є шар пилу, це може призводити до зменшення ефективності гальмування.

Екологічні фактори стосуються впливу гальмової системи на навколишнє середовище. Викиди та забруднення повітря є одним із ключових факторів, особливо тоді, коли в ГВП не працюють пристрої рівномірного зносу і колодки під час руху поїзда торкаються верхніми кінцями об поверхні кочення коліс і зношуються клинодуально. У результаті цього, колодки виділяють шкідливі частинки пилу в повітря, а це негативно впливає як на оточуюче середовище, так на людей і тварин. Взаємодія з іншими джерелами забруднення також впливає на стан колодок, якщо вагон рухається в зоні з високим рівнем забруднення, це може призводити до прискореного зносу колодок. Утилізації відпрацьованих композиційних гальмових колодок на сьогодні не існує і вони також не підлягають відновленню для подальшої експлуатації. Тому колодки масово вивозять на міські сміттєзвалища, що суттєво їх захаращує і вони на них розкладаються сотні років, що в свою чергу призводить до забруднення навколишнього середовища.

Технологічні фактори пов'язані з процесами виготовлення та експлуатації. Якість виготовлення та монтажу є ключовим фактором, якщо композиційні гальмові колодки виготовлені з неякісних матеріалів, це може призводити до їх швидкого зносу. Регулювання та налаштування гальмової системи також впливає на її ефек-

тивність, якщо гальмова система неправильно налаштована, це може призводити до нерівномірного розподілу сили на колодки. Дотримання нормативних вимог експлуатації є ще одним важливим фактором, якщо не дотримуються нормативні вимоги, це може призводити до зниження безпеки та ефективності роботи гальмової системи.

Таким чином, для забезпечення рівномірного розподілу сили натиснення композиційних гальмових колодок необхідно враховувати всі зазначені фактори. У зв'язку з цим передбачається розроблення комплексного підходу до оптимізації сили натиснення гальмових колодок на колеса вагона з метою досягнення однакових вагових коефіцієнтів натиснення. Реалізація такого підходу сприятиме підвищенню ефективності гальмування рухомого складу, зниженню зносу елементів ГВП та підвищенню рівня безпеки експлуатації вагонів.

Висновки.

1. Дослідження особливостей відведення колодок від коліс у візках вантажних вагонів під час попуску гальм показали, що колодки схилиються до спирання верхніми кінцями колодок та здійснюють шкідливе тертя по поверхнях кочення коліс. Аналіз дії сил ГВП вантажних вагонів доводить, що ці сили виникають від ваги деталей, які в гальмовій системі візка з'єднані циліндричними шарнірами з відносно великими зазорами. А оскільки вони розміщені в підресореній частині візка, то вимушені коливання деталей під час руху вагона сприяють виникненню переміщень ударного характеру в цих шарнірних вузлах. Унаслідок цього сила P значно збільшується динамічною складовою $P_{дин}$ жорстко-ударного характеру.

Доведено, що основною причиною виникнення ненормативного зносу колодок вантажних вагонів стає неврівноваженість конструкції тріангеля з приєднаним вертикальним важелем відносно маятникового підвішування, через це під час попуску гальм відбувається нахилання тріангеля до спирання й тертя верхніми кінцями гальмових колодок на поверхні кочення коліс.

2. За результатами аналізу системи маятникового підвішування тріангеля встановлено, що відрегулювати нормативний зазор між колодкою й колесом в умовах експлуатації на тривалий час практично не можливо. Це спричинено значним зносом, який відбувається в кінетостатичних вузлах з'єднання елементів ГВП вагона.

Досліджено залежності величин зазорів між колодкою та колесом від кута відхилення маяткової підвіски у візку. Отримані результати свідчать про те, що верхній кінець колодки відходить від колеса на величину Δ_l значно менше мінімально допустимої відстані за встановленими нормативами – 5 мм, водночас нижній кінець відходить від колеса на величину Δ_n , що значно перевищує максимально допустиму величину 8 мм.

Наявність такої відстані є конструктивним недоліком ГВП візка, яку можна ліквідувати за рахунок модернізації тріангеля, а саме змінити місце розташування отвору у його розпірці. Така модернізація тріангеля дасть можливість забезпечити умову, коли зазори між колодкою і колесом будуть однакові в усіх частинах, тобто $\Delta_l = \Delta_m = \Delta_n$.

3. Встановлено, що нерівномірний розподіл сили натиснення між гальмовими колодками та колесами обумовлений конструкційними особливостями важільної передачі, зносом кінетостатичних вузлів, нерівномірністю регулювання механізмів, а також відмінностями у геометричних параметрах і фізико-механічних характеристиках колодок, які застосовуються у вантажному рухомому складі. З'ясовано, що вплив конструктивних, динамічних, експлуатаційних, технологічних і зовнішніх факторів призводить до суттєвої нерівномірності розподілу сили натиску, що своєю

чергою викликає підвищений знос колодок і зниження ефективності гальмування. Особливу роль у цьому процесі відіграють збільшене осьове навантаження, зміни температурних режимів і механічні деформації вузлів гальмової системи під час експлуатації вагонів.

Подяка

Дане дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення безпеки руху залізничного рухомого складу шляхом впровадження інтегрованих технологій підтримки життєвого циклу» (№ДР 0125U001907), яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2025 року.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dizo J., Blatnický M., Harušinec J., Suchanek A. Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry* [online]. 2022. 14(3), 536. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
2. Dizo J., Blatnický M. Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology* [online]. 2019. 19(2). P. 197–203. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/mt/19/2/197>
3. Гладких І. В., Сулим А. О., Лупітько Н. В. Основні дослідження динаміки оновлення та розвитку парку вантажних вагонів в Україні. Аналітичний огляд. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2020. № 20. С. 4–13.
4. Сулим А. О., Мельник О. О., Бялобжеський О. В., Ломонос А. І. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2021. № 4. С. 118–127. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127>
5. Дячков Д. В., Сулим А. О. Особливості застосування інформаційних систем управління підприємством в умовах цифрової економіки. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. 2020. Вип. 1(83). С. 79–86.
6. Сафронов О. М. Дослідження дискової гальмівної системи пасажирського вагона. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2009. Вип. 14. С. 51–67.
7. Hodges T. A life-cycle approach to braking costs. *International Railway Journal*. 2012. <http://www.railjournal.com>
8. Мазур В. Л., Сіренко К. А. Економічні та екологічні аспекти використання гальмових колодок з чавуну чи композиційного матеріалу для залізничного транспорту. *Метал та лиття України*. 2022. № 3(149). С. 54–62.
9. Sharma R. C., Dhingra M., Pathak R. K. Braking systems in railway vehicles. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2015. Vol. 4. P. 206–211.
10. Сафронов О. М. Застосування комп'ютерного моделювання для уточненої оцінки гальмівної ефективності вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія: Транспортні системи і технології*. 2018. Вип. 32(2). С. 61–75.
11. Блохин Е. П., Алпысбаев К. Т., Панасенко В. Я., Гаркави Н. Я., Клименко И. В., Грановский Р. Б., Федоров Е. Ф. Тележки ZK1 полувагонов, построенных в КНР. *Вагонный парк*. 2012. № 9 (66). С. 12–14.
12. Радзиховский А. А., Омеляненко И. А., Тимошина Л. А. Системный подход к проектированию тележек для грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками. *Вагонный парк*. 2008. № 8. С. 10–16.
13. Радзиховский А. А., Омеляненко И. А., Тимошина Л. А. Устройство отвода тормозных колодок. *Вагонный парк*. 2009. № 11–12. С. 18–21.
14. Босов А. А., Мямлин С. В., Панасенко В. Я., Клименко И. В. Пути совершенствования конструкции тележки грузового вагона. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2009. Вип. 2. С. 27–32.
15. Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Є. С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці. *Метал та лиття України*. 2021. № 2(29). С. 30–39.

16. Sarip S. Design Development of Lightweight Disc Brake for Regenerative Braking – Finite Element Analysis. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*. 2013. Vol. 3(1). P. 52–58.
17. Cruceanu C., Oprea R., Spiroiu M., Craciun C., Arsene S. Computer Aided Study Regarding the Influence of Filling Characteristics on the Longitudinal Reaction within the Body of a Braked Train. *Recent Advances in Computer: Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Computers* (Greece, July 23–25, 2009). P. 531–537.
18. Cruceanu C. Train Braking, Reliability and Safety in Railway. Intech. 2012.
19. Равлюк В. Г. Розвиток наукових основ з забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів: дис.... д-ра техн. наук: 05.22.07. Харків, 2024. 408 с.
20. Gerlici J., Kravchenko K., Fomina Y. Development of an Innovative Technical Solution to Improve the Efficiency of Rolling Stock Friction Brake Elements Operation. In: *International Conference TRANSBALITICA: Transportation Science and Technology*. Cham: Springer International Publishing, 2019. P. 28–38.
21. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Гребенюк В. А., Ткачук М. Р. Визначення факторів, що впливають на надійність роботи гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. Вип. 187. С. 63–74.
22. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Дослідження ненормативного зносу гальмових колодок і його вплив на ефективність гальмування вантажних поїздів. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2022. № 25. С. 30–50. DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-30-50>.
23. Бабаєв А. М., Дмитрієв Д. В. Принцип дії, розрахунки та основи експлуатації гальм рухомого складу залізниць: навчальний посібник. Київ: ДЕТУТ, 2007. 176 с.
24. Равлюк В., Равлюк М., Фісіна Я., Нуруллаєв Р. Уточнені розрахунки 2D схем-моделей гальмових важільних передач для збільшення ресурсу колодок вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. № 35. С. 24–34.
25. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Виявлення причин утворення поверхневих дефектів коліс вагонів, обладнаних композиційними колодками. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології»*. 2022. № 40. С. 102–120. DOI: <http://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-9>.
26. Колодки гальмові композиційні з сітчато-дротяним каркасом для залізничних вантажних вагонів. Технічні умови. ТУ У 6-05495978.017-2001. Білоцерківське ВАТ «Трібо». 30.01.2001. 27 с.
27. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України. ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015: затв. наказом Укрзалізниці від 28.10.1997 р. № 264-Ц. Київ: 2004. 146 с.

V. G. Ravlyuk

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel.: 095-444-59-74, E-mail: ravvg@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

A. O. Lovska

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbak hsq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel.: 066-338-19-46, E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

D. I. Skurikhin

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine
Tel.: 093-847-46-78, E-mail: skurikhin@kart.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3746-5157>

A. V. Rybin

Ukrainian State University of Railway Transport
Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

Tel.: 066-705-32-61, E-mail: rybinandrey@kart.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4430-8018>

M. G. Ravliuk

Ukrainian State University of Railway Transport

Feuerbakh sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

Tel.: 068-064-52-19, E-mail: ravmg@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6021-660X>

STUDY OF THE INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS OF THE FREIGHT WAGON BRAKE SYSTEM ON THE SAFETY OF RAILWAY ROLLING STOCK OPERATION

The article presents an analysis of the performance of the braking system of freight wagons, with a particular focus on the interaction between brake pads and the wheel tread surface. The structural design of the brake triangle, pendulum suspensions, and the brake leverage system is examined, as these components are responsible for applying and releasing the brake pads during braking. It has been identified that the uneven distribution of braking force between the pads and the wheels is caused by design-specific features of the brake system, particularly the location of the vertical lever connection hole within the brake triangle strut. This results in the generation of a detrimental torque, leading to tilting of the brake pads and their uneven wear.

Computer simulations and experimental studies confirmed that the brake triangle is balanced in its assembled state, but its equilibrium may be disrupted under external forces. The kinematics of brake pad movement on pendulum suspensions has been investigated, demonstrating how the pads retract from the wheel during brake release. It has been established that due to design-related factors, uneven gaps form between the pads and the wheel tread, resulting in partial friction and wear of the upper ends of the brake pads during traction and coasting modes of the freight train.

A classification of factors influencing the distribution of braking force between brake pads has been proposed, including structural, technical, dynamic, external, environmental, and technological aspects. Based on the analysis of these factors, the necessity of developing an integrated approach to optimizing the braking system has been substantiated. Such an approach would enable uniform distribution of braking force, reduce wear on braking system components, and improve both the efficiency and safety of freight train braking.

Keywords: traffic safety, brake system, kinematics of brake pads, triangle, brake pads, transport mechanics.

REFERENCES

1. Dizo, J., Blatnický, M., Harusinec, J., & Suchanek, A. (2022). Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry* [online], 14(3), 536. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
2. Dizo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology* [online], 19(2), 197-203. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/mt/19/2/197>
3. Hladkykh, I. V., Sulym, A. O., & Lupitko, N. V. (2020). Osnovni doslidzhennia dynamiky onovlennia ta rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini. *Analitichnyi ohliad* [Main studies of the dynamics of re-

newal and development of the freight car fleet in Ukraine. Analytical review]. Zbirnyk naukovykh prats «Reikovi rukhomiy sklad» - Collection of scientific papers Railbound rolling stock, 20, 4–13 [in Ukrainian]

4. Sulym, A. O., Melnyk, O. O., Bialobrzheskyi, O. V., & Lomonos, A. I. (2021). Doslidzhennia faktoriv ta otsinka rivnia yikh vplyvu na pokaznyk pytomykh vytrat elektroenerhii rukhomoho skladu [Study of factors and assessment of their influence on the indicator of specific electricity consumption of rolling stock]. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia - Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl, 4, 118-127. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127> [in Ukrainian]

5. Diachkov, D. V., & Sulym, A. O. (2020). Osoblyvosti zastosuvannya informatsiinykh system upravlinnia pidpriemstvom v umovakh tsyfrovoy ekonomiky [Features of the use of enterprise management information systems in the digital economy]. Bulletin of Sumy National Agrarian University, 1(83), 79-86 [in Ukrainian]

6. Safronov, O. M. (2009). Doslidzhennia dyskovoi halmivnoi systemy pasazhyrskoho vahona [Study of the disc brake system of a passenger car]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnolohichnoho universytetu transportu, seriia Transportni systemy i tekhnolohii - Collection of scientific papers of the State University of Economics and Technology of Transport, Transport Systems and Technologies series, 14, 51-67 [in Ukrainian]

7. Hodges, T. (2012). A life-cycle approach to braking costs. International Railway Journal. Retrieved from: <http://www.railjournal.com>

8. Mazur, V. L., & Sirenko, K. A. (2022). Ekonomichni ta ekolohichni aspekty vykorystannia halmovykh kolodok z chavunu chy kompozytsiinoho materialu dlia zaliznychnoho transportu [Economic and environmental aspects of using brake pads made of cast iron or composite material for railway transport]. Metal ta lyttia Ukrainy - Metal and casting of Ukraine, 3(149), 54-62 [in Ukrainian]

9. Sharma, R. C., Dhingra, M., Pathak, R. K. (2015). Braking systems in railway vehicles. International Journal of Engineering Research & Technology, 4, 206-211.

10. Safronov, O. M. (2018). Zastosuvannya kompiuternoho modeliuvannya dlia utochnenoi otsinky halmivnoi efektyvnosti vantazhnykh vahoniv [Application of computer modelling for a refined assessment of the braking efficiency of freight cars]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. Seriia: Transportni systemy i tekhnolohii - Collection of scientific papers of the State University of Infrastructure and Technology. Transport systems and technologies series, 32(2), 61-75 [in Ukrainian]

11. Blokhin, E. P., Alpysbayev, K. T., Panasenko, V. Ya., Garkavi, N. Ya., Klimenko, I. V., Granovskiy, R. B., & Fedorov, E. F. (2012). Telezhki ZK1 poluvagonov, postroennykh v KNR [ZK1 bogies of gondola wagons built in the PRC]. Vagonnyy park - Wagon fleet, 9(66), 12-14

12. Radzihovskiy, A. A., Omelyanenko, I. A., & Timoshina, L. A. (2008). Sistemnyy podhod k proektirovaniyu telezhek dlya gruzovykh vagonov s povyshennymi osevymi nagruzkami [System approach to bogie design for freight wagons with increased axial loads]. Vagonnyy park - Wagon fleet, 8, 10-16

13. Radzihovskiy, A. A., Omelyanenko, I. A., & Timoshina, L. A. (2009). Ustroystvo otvoda tormoznykh kolodok [Brake shoe withdrawal device]. Vagonnyy park - Wagon park, 11-12, 18-21

14. Bosov, A. A., Myamlin, S. V., Panasenko, V. Ya., & Klimenko, I. V. (2009). Puti sovershenstvovaniya konstrukcii telezhek gruzovogo vagona [Ways to improve the design of a freight car bogie]. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana – Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, 27-32

15. Mazur, V. L., Naidek, V. L., & Popov, Ye. S. (2021). Porivniannia chavunnykh i kompozytsiinykh z chavunnymy vstavkami halmovykh kolodok dlia rukhomoho skladu zaliznytsi [Comparison of cast iron and composite brake pads with cast iron inserts for railway rolling stock]. Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and casting of Ukraine, 2(29), 30-39 [in Ukrainian]

16. Sarip, S. (2013). Design Development of Lightweight Disc Brake for Regenerative Braking – Finite Element Analysis. International Journal of Applied Physics and Mathematics, 3(1), 52-58.

17. Cruceanu, C., Oprea, R., Spiroiu, M., Craciun, C., Arsene, S. (2009). Computer Aided Study Regarding the Influence of Filling Characteristics on the Longitudinal Reaction with in the Body of a Braked Train. Recent Advances in Computer. Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Computers, (Greece, July 23–25, 2009), 531-537.

18. Cruceanu, C. (2012). Train Braking, Reliability and Safety in Railway, Intech.

19. Ravlyuk, V. G. (2024). Rozvytok naukovykh osnov z ubezpechennia rukhu poizdiv shliakhom pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii halmovykh system vantazhnykh vahoniv [Development of scientific foundations for train traffic safety by increasing the efficiency of freight car brake systems operation]. Candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian]

20. Gerlici, J., Kravchenko, K., & Fomina, Y. (2019). Development of an Innovative Technical Solution to Improve the Efficiency of Rolling Stock Friction Brake Elements Operation. In: International Conference TRANSBALICA: Transportation Science and Technology. Cham: Springer International Publishing, 28-38.
21. Ravlyuk, V. G., Ravlyuk, M. G., Hrebeniuk, V. A., & Tkachuk, M. R. (2019). Vyznachennia faktoriv, shcho vplyvaiut na nadiinist roboty halmovoi vazhilnoi peredachi vizkiv vantazhnykh vahoniv [Determination of factors influencing the reliability of the brake lever transmission of freight car bogies]. Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collection of scientific papers of the Ukrainian State University of Railway Transport, 187, 63-74 [in Ukrainian]
22. Lovska, A. O., & Ravlyuk, V. G. (2022). Doslidzhennia nenormatyvnoho znosu halmovykh kolodok i yoho vplyv na efektyvnist halmuvannia vantazhnykh poizdiv [Research of abnormal wear of brake pads and its influence on the efficiency of braking freight trains]. Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» – Collection of scientific papers Railbound rolling stock, 25, 30-50 DOI: <http://doi.org/10.47675/2304-6309-2022-25-30-50>. [in Ukrainian]
23. Babaiev, A. M., & Dmytriiev, D. V. (2007). Pryntsyp dii, rozrakhunky ta osnovy ekspluatatsii halm rukhomoho skladu zaliznyts [Principle of operation, calculations and basics of operation of brakes of railway rolling stock] [in Ukrainian]
24. Ravliuk, V., Ravliuk, M., Fisina, Ya., & Nurullaiev, R. (2020). Utochneni rozrakhunky 2D skhem-modelei halmovykh vazhilnykh peredach dlia zbilshennia resursu kolodok vantazhnykh vahoniv [Improved calculations of 2D scheme-models of brake lever gears to increase the service life of freight car pads]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii: Seriya: Transportni systemy i tekhnolohii – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technology: Transport Systems and Technologies series, 35, 24-34 [in Ukrainian]
25. Lovska, A. O., & Ravliuk, V. G. (2022). Vyiavlennia prychyn utvorennia poverkhnevnykh defektiv kolis vahoniv, obladnanykh kompozytsiinymy kolodkami [Identification of the causes of formation of surface defects of wheels of wagons equipped with composite pads]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii: Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technology: Transport Systems and Technologies series, 40, 102-120 DOI: <http://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-9>. [in Ukrainian]
26. Kolodky halmovi kompozytsiini z sitchato-drotianym karkasom dlia zaliznychnykh vantazhnykh vahoniv. Tekhnichni umovy [Composite brake pads with a mesh-wire frame for railway freight cars. Technical specifications]. (2001). TU U 6-05495978.017-2001 [in Ukrainian]
27. Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliznytsiakh Ukrainy [Instruction on the operation of rolling stock brakes on the railways of Ukraine]. (2004). TsT-TsV-TsL-0015 [in Ukrainian]