

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту

РАВЛЮК ВАСИЛЬ ГРИГОРОВИЧ



УДК 629.4.017:629.4.018

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ З УБЕЗПЕЧЕННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ
ШЛЯХОМ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЛЬМОВИХ
СИСТЕМ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2024

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
ЛОВСЬКА Альона Олександрівна,
Український державний університет
залізничного транспорту, кафедра інженерії
вагонів та якості продукції, професор кафедри.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КАПЦА Михайло Іванович, Український
державний університет науки і технологій,
директор навчально-наукового інституту
«Дніпровський інститут інфраструктури
і транспорту»;

доктор технічних наук, професор
САПРОНОВА Світлана Юріївна,
Державний університет інфраструктури та
технологій, кафедра вагонів та вагонного
господарства, професор кафедри;

доктор технічних наук, професор
МАСЛІЄВ Вячеслав Георгійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
кафедра електричного транспорту
та тепловозобудування, професор кафедри.

Захист відбудеться “14” червня 2024 р. о 11.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий “7” травня 2024 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. В. Прохорченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток транспортної системи України потребує комплексного вирішення завдань щодо підвищення ефективності експлуатації залізничного рухомого складу й гарантування безпеки руху поїздів, а зростання обсягів перевезень вантажів на АТ «Укрзалізниця» – збільшення ваги вантажних поїздів і швидкості їх руху. Це можна досягти за умови надійної роботи автоматичних гальм рухомого складу. Проте виконаний аналіз транспортних подій у вагонному господарстві доводить, що за останні роки значно погіршився технічний стан гальмового обладнання. Найбільша кількість пошкоджень припадає на механічну частину гальм, від якої насамперед залежить безпека руху поїздів. За результатами обстежень гальмових систем візків вантажних вагонів як інвентарного парку АТ «Укрзалізниця», так і промислових підприємств було встановлено, що більшість пристроїв для рівномірного відведення колодок від коліс знаходяться в незадовільному стані. Одна з причин – недосконала конструкція гальмової важільної передачі візка.

Типовий тріангель, який застосовується у візках, має врівноважену конструкцію відносно свого підвішування. Однак після приєднання до нього деталей гальмової важільної передачі ця умова порушується. Під дією сил, які створюються вагою приєднаних деталей, тріангелі нахилиються і наближуються до коліс, що супроводжується притиснення верхніх кінців колодок. Під час руху вагона без гальмування відбувається інтенсивне тертя верхніх кінців колодок об колеса. Внаслідок цього на верхніх частинах гальмової площі колодок інтенсивно зростає шкідлива стертість, яка спричиняє їх ненормативний знос. Під час гальмувань шкідлива стертість колодок додає небажаного контактного тертя, через що погіршується ефективність гальмувань у поїздах і зростає загроза безпеці руху поїздів. Також створюються сприятливі умови для виникнення високотемпературних поверхневих пошкоджень коліс. Тому рух у більшості вантажних поїздів супроводжується гучним постукуванням коліс, що збільшує опір рухові та призводить до зайвих витрат енергоносіїв на тягу поїздів.

Зважаючи на вищевикладене, тема дисертаційної роботи є актуальною і присвячена розвитку наукових основ з забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів, зорієнтована на вирішення проблеми за рахунок модернізації гальмових систем тріангельних пристроїв вантажних візків. Це дасть змогу підвищити швидкість руху та ефективність процесу гальмування вантажних поїздів, зменшити експлуатаційні витрати і собівартість вантажних перевезень, збільшити ресурс вузлів гальмових систем візків на весь гарантований міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів, незалежно від виконаного виду ремонту, і покращити безпеку руху поїздів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України (КМУ) від 07.04.2021 р. № 321-р, а також науково-дослідних робіт за темами: «Розроблення конструкторської документації для виготовлення дослідного зразка

пристрою для запобігання клиновидного зносу гальмових колодок вантажних вагонів» (ДР 0108U006508); «Розробка конструкторсько-технологічної документації на проведення модернізації гальмових важільних передач візків вантажних вагонів» (ДР 0111U008972); «Проведення розширених експлуатаційних випробовувань важільних передач візків вантажних вагонів обладнаних пристроями рівномірного зносу гальмових колодок» (ДР 0113U001807); «Проведення експертизи стандарту «Ресурсні елементні кошторисні норми. Технічне обслуговування і ремонт устаткування. Рухомий склад» (ДР 0117U003257); «Вимоги безпеки під час технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів та рефрижераторного рухомого складу» (ДР 0122U000287); «Використання нетрадиційних методів отримання нанопорошків і спікання при розробці модифікованої муліто-ZrO₂ кераміки стійкої до термоудару» (ДР 0121U109441), у яких автор був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток теоретичних положень, методологічних основ і практичних рішень щодо забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів.

Для досягнення вказаної мети в роботі були поставлені такі основні завдання наукових досліджень:

- провести аналіз стану проблеми щодо забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів;
- запропонувати класифікацію видів і типів зносу композиційних гальмових колодок, визначити особливості квазістатичного підходу до створення теорії зношування колодок у гальмових системах візків вантажних вагонів;
- на підставі системного підходу класифікувати фактори, що впливають на працездатність і ефективність роботи гальмових систем візків вантажних вагонів;
- розробити графоаналітичний метод на основі емпіричних величин шкідливого зносу гальмових колодок для визначення коефіцієнта клинодуальності залежно від пробігу вантажного вагона;
- сформулювати метод для визначення геометричних параметрів колодок вантажних вагонів з урахуванням наявної у верхній частині колодки шкідливої стертості;
- визначити теплові режими під час гальмування вагона на поверхні тертя триботехнічної пари «гальмова колодка – колесо» залежно від зносу колодок;
- провести визначення термонапруженого стану композиційної гальмової колодки за умови високотемпературного впливу на поверхню кочення коліс в умовах експлуатаційних режимів;
- провести теоретичне обґрунтування напряму модернізації гальмових систем візків вантажних вагонів;
- виконати експериментальні випробування, за результатами яких проаналізувати вплив модернізації важільної передачі на ефективність роботи гальмової системи вантажного вагона в цілому;
- спрогнозувати залишковий ресурс композиційних гальмових колодок модернізованих гальмових важільних передач залежно від пробігу вагона на підставі отриманих статистичних величин;

– запропонувати методологію визначення економічного й екологічного ефекту від використання модернізованої гальмової важільної передачі.

Об'єкт дослідження – процес гальмування вантажного вагона у складі поїзда.

Предмет дослідження – функціональні параметри гальмової системи вантажного вагона з урахуванням конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів із умов безпеки руху.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися такі теорії й методи досліджень: методи теорії ймовірностей і математичної статистики і математичного планування експериментів для проведення аналізу зібраних в умовах експлуатації статистичних даних і перевірки на точність й адекватність розроблених математичних моделей; методи теоретичної механіки для визначення дослідження принципу роботи гальмових важільних передач; методи скінчених елементів і методи будівельної механіки для визначення основних показників міцності елементів гальмових систем візків вантажних вагонів; статистичні методи для побудови регресійних моделей і їх верифікації.

Наукова новизна одержаних результатів. Розвинуто наукові основи з забезпечення руху вантажних поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації їх гальм, зокрема механічних гальмових систем візків вантажних вагонів.

Вперше:

– з використанням системного підходу класифіковано фактори, що впливають на характер і причини виникнення фрикційних зносів композиційних колодок гальмових систем візків вантажних вагонів в умовах експлуатації;

– розроблено графоаналітичний метод для визначення коефіцієнта клинодуальності гальмової колодки залежно від пробігу вагона, що дає змогу оцінити ефективність гальмування та спрогнозувати безпечні умови обігу вагона;

– сформовано метод для визначення геометричних параметрів корисної площі контакту гальмової колодки з поверхнею кочення колеса за утвореної верхньої шкідливої стертості залежно від величини зазора між колесом і колодкою;

– отримано закономірності для прогнозування величин зносу колодок вантажних вагонів із модернізованими гальмовими важільними передачами, розробленими за технологією УкрДАЗТ, що дає змогу отримати уточнені геометричні параметри колодки залежно від пробігу вагона.

Дістали подальшого розвитку:

– метод визначення міцності композиційної гальмової колодки з урахуванням її нерівномірного навантаження, яке утворюється через недосконалість конструкції гальмової важільної передачі візка вантажного вагона;

– регресійна модель для прогнозування ресурсу гальмових колодок з урахуванням застосування модернізованих гальмових важільних передач, розроблених за технологією УкрДАЗТ, що, на відміну від існуючих моделей, дає можливість прогнозувати залишковий ресурс колодок за їх граничної товщини на весь гарантований міжремонтний період експлуатації вантажного вагона.

Удосконалено:

– науковий підхід щодо проектування тріангельних гальмових систем візків вантажних вагонів, зокрема обґрунтовано доцільність вибору схем і розрахункових

математичних моделей з урахуванням модернізації елементів гальмових важільних передач під час виконання планових видів ремонту.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано практичні рішення, спрямовані на підвищення ефективності гальмування поїздів, зменшення собівартості вантажних перевезень і покращення безпеки руху поїздів на залізничному транспорті; створено комп'ютерні моделі гальмових важільних передач візків вантажних вагонів, які дають змогу визначити міцність їх складових в експлуатації; створено комп'ютерні моделі гальмових колодок, які дають змогу визначити їх навантаженість в умовах експлуатаційних режимів.

Результати наукових досліджень, отримані в роботі, доцільно застосовувати в конструкторських і технологічних відділах як під час проектування гальмових систем ходових частин вагонів, так і для удосконалення вагонів, які зараз експлуатуються на залізниці;

– удосконалено та запатентовано інноваційні конструкції гальмових важільних передач вантажних вагонів (Патенти України: 121003, 118624, 121889, 153753, 154619);

– запропоновано зміни та доповнення до нормативного документа ДСТУ ГОСТ 4686:2018 – Триангелі гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. Технічні умови через урахування конструктивних змін у розпірці триангеля.

Практичне значення отриманих результатів роботи підтверджено відповідними актами впровадження в ДП «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» (м. Кременчук) і філію «Панютинський вагоноремонтний завод» АТ «Укрзалізниця» (сmt. Панютине). Також результати, отримані в дисертаційній роботі, використовуються в навчальному процесі кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) при підготовці здобувачів вищої освіти (бакалаврів і магістрів) за спеціальністю 273 – Залізничний транспорт, а також для слухачів навчально-наукового центру освіти дорослих.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані особисто здобувачем або за його безпосередньої участі. Наукові публікації [1 – 8, 19, 26 – 30, 35, 37, 38, 43, 46, 47] опубліковані без співавторів. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [9] – створення квазідинамічних моделей для удосконалення гальмової системи візка вантажного вагона; [10] – створення закономірностей геометричних параметрів корисної площі контакту колодок за утвореного верхнього шкідливого зносу залежно від зазора між колесом і гальмовою колодкою; [11] – створення регресійної моделі для прогнозування залишкового ресурсу колодок за товщиною залежно від пробігів вантажних вагонів; [12] – визначення ресурсних характеристик для прогнозування геометричних параметрів композиційних колодок залежно від пробігу вантажного вагона з модернізованою важільною передачею візка; [13] – розроблення схеми-моделі важільної передачі для визначення силових факторів, що дають змогу створити передумови до проектування сучасних гальмових систем візків вантажних вагонів; [14] – прогнозування граничного ресурсу композиційних колодок гальмової системи візка з модернізованою передачею залежно від пробігу вантажного вагона; [15] – систематизація дефектів коліс вантажних вагонів і визначення термонапруженого стану колеса при взаємодії з композиційною колодкою під час гальмування; [16] – розроблення процедури проведення виробничих

досліджень щодо зносу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів і визначення класифікації їх видів і типів зносу; [17] – створення закономірностей прогнозування залишкового ресурсу композиційних колодок модернізованих гальмових важільних передач залежно від пробігів вантажних вагонів; [18] – визначення полів розподілення напружень в башмаку при його нерівномірному навантаженні від композиційної гальмової колодки; [20] – розроблення інноваційного пристрою гальмової системи візка вантажного вагона й способу модернізації розпірок тріангеля; [21] – створення скінчено-елементної моделі гальмового циліндра з метою визначення міцності його конструкції; [22] – створення скінчено-елементних моделей колодок з номінальними параметрами й клинодуальним зносом з метою визначення їх термонапруженого стану; [23] – визначення питомого енергоспоживання для різних типів тягового рухомого складу під час застосування модернізованої важільної передачі візка; [24] – розроблення графоаналітичного методу для визначення коефіцієнта клинодуальності композиційних гальмових колодок залежно від пробігу вантажного вагона; [25] – розроблення математичного апарату для визначення міцності композиційної гальмової колодки при її нерівномірному навантаженні; [31, 33, 34, 40, 41, 44, 50, 52, 57, 60, 64] – створення закономірностей оцінювання гальмової ефективності засобів рухомого складу, обладнаного композиційними гальмовими колодками через їх ненормативний знос; [32, 49, 54 – 56, 58, 59] – створення скінчено-елементних моделей триботехнічних пар гальмових систем візків вантажних вагонів і проведення розрахунку на міцність за різних експлуатаційних режимів навантаження; [39, 42, 45, 48, 62] – створення квазідинамічних моделей важільних передач гальмових систем візків вантажних вагонів для визначення раціональних рішень модернізації з погляду детермінованого силового навантаження елементів важільних передач при гальмуванні; [36, 51, 53, 61, 63, 65 – 67] – впровадження пружно-стрижневих і напрямних елементів у гальмових важільних передачах візків вантажних вагонів для ліквідації ненормативного зносу гальмових колодок в експлуатації. Дослідження, висвітлені в усіх наукових працях, проводилися в УкрДУЗТ.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали результатів дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали схвалення на 33 наукових конференціях: 79 Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті», УкрДУЗТ, 2017 (Україна, м. Харків); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми розвитку транспорту і логістики», СНУ ім. В. Даля, 2017 (Україна, м. Одеса); III, IV Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика», 2017, 2018 (Україна, м. Маріуполь); 77, 78 Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2017, 2018 (Україна, м. Дніпро); 15th International scientific conference «European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences». «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2017 (Austria, Vienna); I, II, III, V Міжнародних науково-практичних конференціях «Прикладні науково-технічні дослідження», Академія технічних наук України, ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника» 2017, 2018, 2019, 2021 (Україна, м. Івано-Франківськ); XIV international research and practice conference «Modern scientific potential – 2018». Construction and architecture Mathematics Modern information technology Technical science Physics. Science and education LTD, 2018 (Great Britain, Sheffield); International scientific and practical conference «Globalization of scientific and educational space».

Innovations of transport. Problems, experience, prospects, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018 (Italy, Rome); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Транспорт і логістика: проблеми та рішення», СНУ ім. В. Даля, 2018 (Україна, м. Одеса); 8 Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», УкрДУЗТ, 2019 (Україна, м. Харків); Науково-практичних конференціях здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», СНУ ім. В. Даля, 2018, 2019 (Україна, Київ, Лиман); 2, 3 Міжнародних науково-технічних конференціях «Інтелектуальні транспортні технології», УкрДУЗТ, 2021, 2022 (Україна, м. Харків); 1 Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології засобів транспорту», УкрДУЗТ, 2021 (Україна, м. Харків); V Міжнародній науково-практичній конференції «Наука. Технології, інновації, світові тенденції та регіональний аспект», Інститут інноваційної освіти, 2022 (Україна, м. Одеса); III Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем», НУВГП, 2022 (Україна, м. Рівне); XIV науковій конференції «Наукові підсумки 2022 року», Технологічний центр, 2022 (Україна, м. Харків); IV Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції «Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку», КІЗТ ДУІТ, 2022 (Україна, м. Київ); 6 th Annual Conferences «Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions», Scientific Route, 2022 (Tallin, Estonia); Міжнародній мультидисциплінарній науково-практичній інтернет-конференції молодих дослідників, здобувачів вищої освіти та науковців «Сучасна наука: інновації та перспективи», КІЗТ ДУІТ, 2023 (Україна, м. Київ); 82 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Український державний університет науки і технологій, 2023 (Україна, м. Дніпро); II Міжнародній науково-практичній конференції «Транспорт: наука та практика», Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2023 (Україна, м. Київ); 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023), Kryvyi Rih National University, 2023 (Ukraine, Kryvyi Rih); 2nd International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering (STUE 2023), O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2023 (Ukraine, Kharkiv); XXVI Міжнародній науково-технічній конференції «Технологія – 2023», Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2023 (Україна, м. Київ); 26th International Conference Current Problems in Rail Vehicles: Prorail 2023, Scientific and Technical Society at the University of Zilina, 2023 (Slovakia, Zilina); III Міжнародній науково-практичній конференції «Рухомий склад нового покоління: із ХХ в ХХІ сторіччя», УкрДУЗТ, 2023 (Україна, м. Харків).

У повному обсязі результати дисертаційної роботи обговорені та схвалені на розширеному семінарі кафедри інженерії вагонів та якості продукції УкрДУЗТ.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень опубліковані в 67 наукових працях: 25 основних працях, з яких 16 статей у наукових фахових виданнях України (з них 8 – без співавторів); 6 наукових статей, що індексуються наукометричними базами даних SCOPUS та/або WoS (з них 1 – першого квартилю (Q1), 1 – другого квартилю (Q2), 4 – третього квартилю (Q3)); 1 – в іноземному періодичному науковому виданні; 2 патентах України на винаходи та 42 публікаціях, які додатково відображають наукові результати досліджень.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація має вступ, шість розділів, висновки, список використаних джерел з 261 найменувань і шість додатків.

Повний обсяг дисертації складає 408 сторінок, у тому числі 273 сторінки основного тексту, 31 таблицю, 125 рисунків, 46 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, об'єкт, предмет і завдання дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено інформацію про апробації роботи і публікації основних результатів.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми розвитку наукових основ з забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності гальмових систем вантажних вагонів. Аналіз транспортних подій у вагонному господарстві показав, що найбільша кількість відмов і несправностей вантажних вагонів в експлуатації припадає на гальмове обладнання. У зв'язку з цим проведено дослідження технічного стану елементів механічної частини гальмових систем візків (ГСВ) у підрозділах з експлуатації та ремонту вагонів. Проведено огляд наукових публікацій і нормативних джерел про умови експлуатації механічних ГСВ вантажних вагонів, а також заходи щодо їх удосконалення.

У створення науково-технічного заділу з удосконалення конструкції ГСВ вантажних вагонів значний внесок зробили науковці та фахівці багатьох науково-дослідних закладів і ЗВО: Українського науково-дослідного інституту вагонобудування (м. Кременчук), Науково-дослідного та конструкторсько-технологічного інституту залізничного транспорту АТ «Укрзалізниця» (м. Київ), Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків), Українського державного університету науки і технологій (м. Дніпро), Державного університету інфраструктури та технологій (м. Київ), Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Київ) та ін. За кордоном над удосконаленням роботи, проведенням натурних і стендових досліджень механічних гальмових системи рухомого складу і впровадження їх у дію працюють такі відомі виробники, як Knorr-Bremse, DAKO-CZ, Siemens, Westinghouse Air Brake Company (WABCO), Wabtec, Japan Railway Technical Research Institute та ін.

Питання підвищення ефективності експлуатації залізничного рухомого складу (РС) та забезпечення руху поїздів висвітлені у роботах А. М. Бабаєва, М. М. Бабаєва, О. Б. Бабаніна, Є. П. Блохіна, Г. І. Богомазова, І. Д. Борзилова, Т. В. Бутько, Ю. Я. Водяннікова, В. Ф. Головка, А. П. Горбенка, М. І. Горбунова, В. Л. Горобця, О. М. Горобченка, В. Д. Дановича, Ю. М. Дацуна, Д. В. Дмитрієва, А. В. Донченка, Ю. В. Дьоміна, Ю. Є. Калабухіна, М. І. Капіці, М. Б. Кельріха, О. М. Коптовця, М. В. Коренівського, М. Л. Коротенка, В. А. Лазаряна, А. О. Ловської, Д. В. Ломотька, В. Л. Мазура, Л. А. Манашкіна, І. Е. Мартинова, В. Г. Маслієва, В. І. Мойсеєнка, В. І. Мороза, Л. А. Мурадяна, С. В. Мямліна, С. І. Нечволода, О. М. Огара, Ю. І. Осеніна, С. В. Панченка, А. В. Прохорченка, О. М. Савчука, В. М. Самсонкіна, С. Ю. Сапронової, О. М. Сафронова, В. М. Старченка, Е. Д. Тартаковського, В. П. Ткаченка, О. В. Устенка, В. Ф. Ушкалова, А. П. Фалендиша, О. В. Фоміна, В. В. Шевченка, С. Cruceanu, J. Gerlici, I. Kiss,

L. Pascu, R. C. Sharma, S. Teimourimanesh, M. R. K. Vakkalagadda, T. Vernersson, K. P. Vineesh, Y. Zhang та ін.

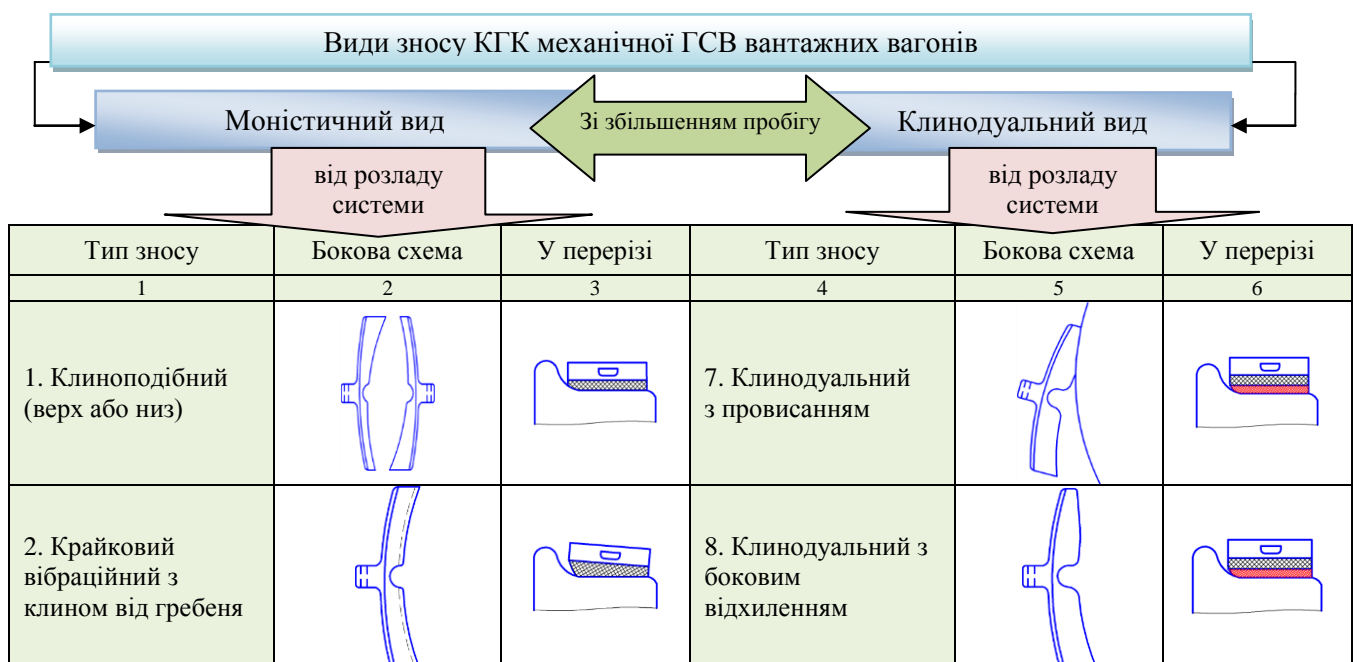
Комплексні дослідження, спрямовані на виявлення пристроїв із запобігання ненормативному зносу колодок ГСВ вантажних вагонів як вітчизняних, так і закордонних розробок: «JAXON TMB», «AmstedRail», «Truck Mounted Brake Systems», показали, що серед них немає таких, які б ефективно забезпечували рівномірний знос колодок.

При цьому подальший розвиток питань з убезпечення руху поїздів, зокрема шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів є, досить актуальним завданням.

Аналіз чинних нормативних і технічних документів встановив, що вони не відображають повною мірою напрями з принципово новим підходом до модернізації, проектування та удосконалення елементів ГСВ стосовно запобігання ненормативному зносу композиційних гальмових колодок (КГК) вантажних вагонів. Це призводить до відмов пристроїв рівномірного зносу колодок в умовах експлуатації, спричиняє ненормативний знос колодок і зменшує їх ресурс, а також збільшує експлуатаційні витрати на утримання парку вантажних вагонів і негативно впливає на безпеку руху (БР) поїздів.

У **другому розділі** дисертаційної роботи сформовано математичні та комп'ютерні моделі для визначення зносів колодок ГСВ вантажних вагонів.

Для визначення зносів колодок виконано натурні дослідження, за результатами яких розроблено класифікацію видів і типів зносу КГК вагонів, яку слід розглядати як два якісні види – моністичний і клинодуальний (рисунк 1). Досліджено порівняльні характеристики цих видів ненормативного зносу колодок вагонів, які доводять, що клинодуальний знос погіршує ефективність гальмування на 20 – 30 %, зменшує ресурс КГК на 30 – 55 % і призводить до збільшених експлуатаційних витрат.



Продовження рисунка 1




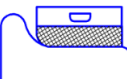
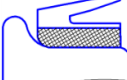
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. Однобічний із клином до торця колеса |  |  | 9. Клинодуальний у верхній та нижній частині (виконувалося розвертання) |  |  |
| 4. Вкраплювання металу в робочу (гальмову) площину тертя колодки з поверхні кочення коліс |  |  | 10. Гребеневий клинодуальний зі сповзанням по поверхні кочення до торця колеса |  |  |
| 5. Рівномірний за товщиною $b_e = b_n$ |  |  | 11. Клинодуальний з провисанням у верхній частині й залишками нової колодки внизу |  |  |
| 6. Пошкодження вушка для встановлення чеки |  |  | 12. Граничний знос з відламуванням частини (верхньої або нижньої) колодки |  |  |

Рисунок 1 – Класифікація видів і типів зносу КГК вагонів

За результатами експлуатаційних досліджень встановлено, що КГК у поперечних перерізах своєї довжини зношуються нерівномірно, зменшуючись клинодуально за товщиною. На підставі проведеного аналізу встановлено, що на колодках утворюються дві площини зносу: верхня – де колодка стирається кососиметрично під час руху вагонів без гальмування, досить інтенсивно; нижня – якою здійснюється гальмування. Фактично робоче тіло КГК зношується подвійно з лінією розмежування двох площин тертя, тому такий стан колодок дефініційовано окремо, як клинодуальний фрикційний знос. На рисунку 2 наведено клинодуально зношену КГК з істотним зменшенням робочої площі і досить великими залишками робочого тіла, демонтовану з вагона, який мав зовсім незначний пробіг – 2078 км, через загрозу БР.

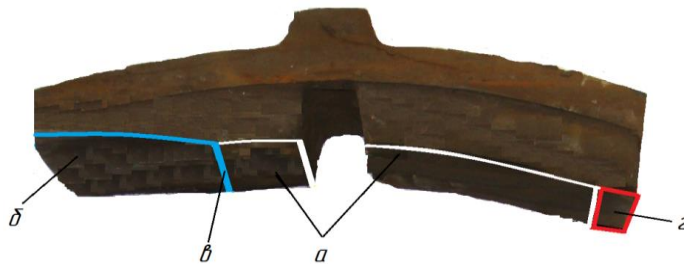


Рисунок 2 – Вигляд клинодуально зношеної КГК:

a – робоча площина; b – площина шкідливої стертості; $в$ – лінія розмежування площин; z – залишок площини нової колодки, який не брав участі в гальмуваннях вагона

На підставі системного підходу наведено класифікацію конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів, що впливають на працездатність і ефективність роботи ГСВ вантажних вагонів і БР поїздів (рисунок 3).

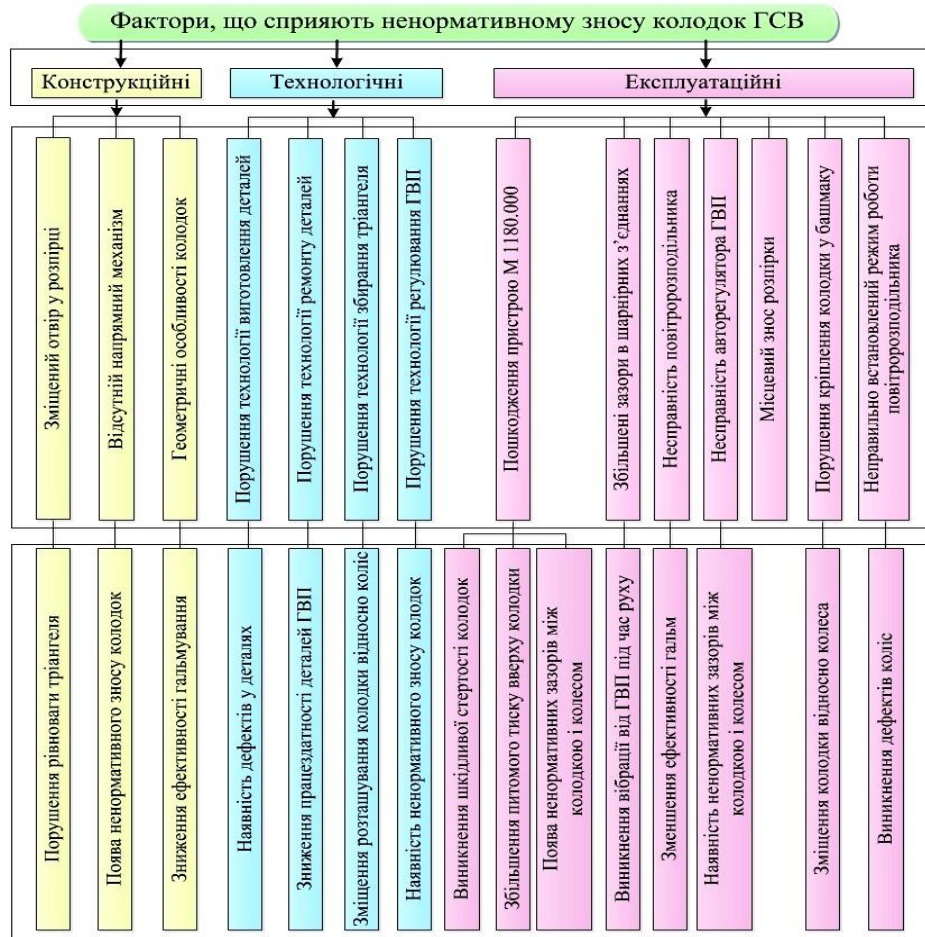


Рисунок 3 – Класифікація факторів, що впливають на працездатність ГСВ

На підставі проведених теоретичних досліджень доведено, що ефективна площа робочої поверхні колодки Q_{ef} під час гальмування буде зменшуватися зі збільшенням площі шкідливої стертості $Q_{уст}$, тобто

$$Q_{ef} = (Q - Q_{\epsilon}) - Q_{уст} = m[(l - l_{\epsilon}) - l_{уст}] = m \cdot l_{ef}, \quad (1)$$

де Q – прямокутна проекція площі робочої поверхні колодки, $Q = 2l \cdot m$; Q_{ϵ} – вилучена з Q така сама проекція площі під «виїмку», $Q_{\epsilon} = m \cdot l_{\epsilon}$; $Q_{уст}$ – змінна проекція площі шкідливої стертості, $Q_{уст} = m \cdot l_{уст}$; l_{ef} – змінна ефективна довжина нової колодки, $l_{ef} = (2l - l_{\epsilon} - l_{уст})$.

Для визначення причин виникнення клинодуального зносу колодок проведено дослідження, за результатами якого встановлено, що такий вид зносу відбувається через недосконалу конструкцію триангеля й низьку надійність пристрою рівномірного відведення колодок від коліс. У гальмових важільних передачах (ГВП) деталі, що приєднуються до триангеля, створюють власною вагою гравітаційну силу G (рисунок 4, а), яка нахилиє колодки й повертає їх навколо кінематичного вузла d до притиснення зусиллям U в колеса, що обертаються. Це призводить до збільшення фрикційного зносу й утворення площі шкідливої стертості поверхні $Q_{уст}$, на якій розподілена сила U з питомим зусиллям q_{cm} . Під дією таких зусиль утворюється сила тертя $F_{тр}$, а в контакті колеса з рейкою виникає і реалізується зусилля опору $B_{он}$ кочення колеса.

Під час гальмування колодкою з верхньою шкідливою стертістю сила

натиснення K здійснює її поворот навколо точки A (рисунок 4, б). Тому верхня, уже стерта частина колодки, відходить від поверхні кочення колеса й не бере участі в гальмуваннях. Нижня частина колодки притискається до колеса, але вже вкороченою частиною. Через це питомі гальмові натиснення q_{ef} перерозподіляються вздовж колодки нерівномірно. У верхній частині колодки концентруються значно більші питомі гальмові натиснення, які поступово зменшуються до її низу. Через це пропорційно змінюються інтенсивність зносу колодки й температура триботехнічної пари під час гальмувань. Результуюче значення гальмової сили за наявності клинодуального зносу колодки може бути визначено з аналітичного виразу

$$B_{ГД} = F_{mp} = K \cdot \varphi_k \cdot \xi_{Д}, \quad (2)$$

де φ_k – коефіцієнт тертя колодок; $\xi_{Д}$ – коефіцієнт зменшення сили тертя через клинодуальний знос КГК.

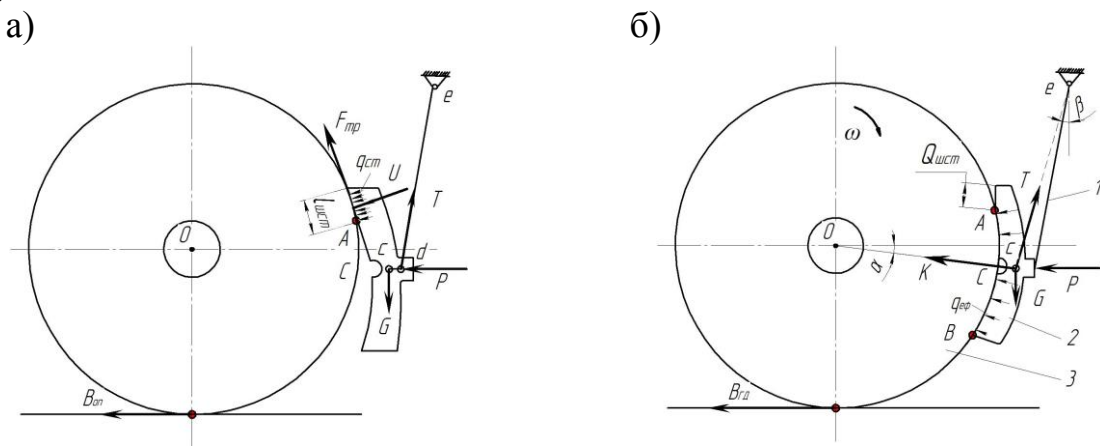


Рисунок 4 – Схема утворення клинодуального зносу колодки:

- а) стирання верхнього кінця колодки під час руху без гальмувань; б) гальмування клинодуально зношеною колодкою; 1 – маятникова підвіска; 2 – колодка; 3 – колесо; α – кут заниження колодки; β – кут підвішування колодки

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що товщина колодки не є постійною через її знос в умовах експлуатації. А наявність кута α цей процес прискорює за рахунок того, що ефективна площа поверхні колодки Q_{ef} стає меншою, а контактне фрикційне напруження між колодкою і колесом збільшується.

Встановлено, що під час гальмувань верхня стерта частина колодок не доходить до колеса й не бере участі у створенні гальмової сили. Фрикційна взаємодія колодок з колесами, а отже, і ефективність гальмового процесу знижується через перерозподіл питомих тисків за довжиною колодок. Тому в роботі для вирішення такої проблеми запропоновано застосовувати метод квазістатичного аналізу для чавунних колодок, який було розроблено В. А. Щепетильниковим. Особливості цього методу полягають у застосуванні його до КГК шляхом урахування шкідливої стертості верхнього кінця, яка спричиняє клинодуальний знос колодки.

Розроблено блок-схему програми на ЕОМ для аналітичного розв'язання задачі про квазістатичну рівновагу сил і моментів, що діють під час гальмування колеса колодковим гальмом у випадку двостороннього руху коліс вагона за умови клинодуального зносу колодки, реалізовану геометрично (рисунок 5).

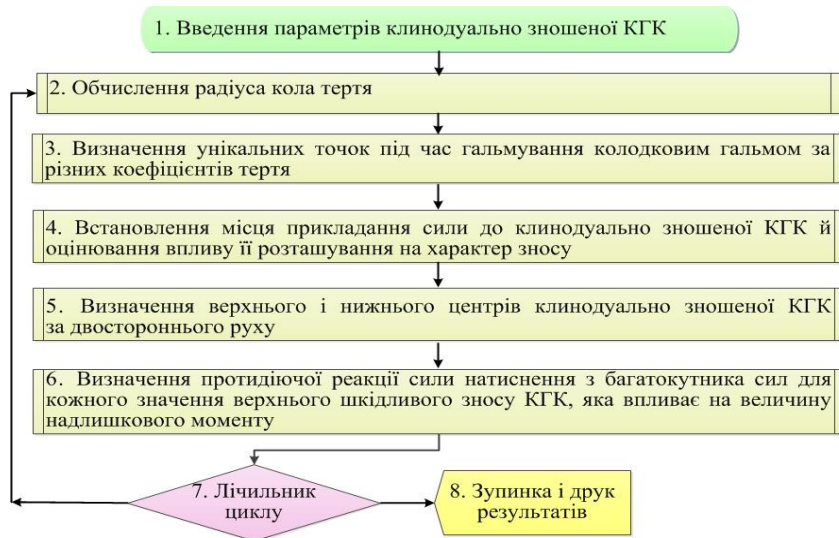


Рисунок 5 – Блок-схема програми аналітичного розв’язання задачі стосовно квазістатичної рівноваги сил і моментів, що діють під час гальмування

Використання запропонованої блок-схеми сприятиме створенню рекомендацій щодо проектування сучасних механічних ГСВ вантажних вагонів з покращеними показниками їх надійності в експлуатації.

Для підвищення ефективності гальмування і поліпшення БР розроблено графоаналітичний метод на підставі емпіричних величин для визначення коефіцієнта клинодуальності КГК. Встановлено, що зі збільшенням пробігу вагонів поступово буде відбуватися й знос КГК. Однак через недосконалу конструкцію ГВП у верхній частині колодки AK (рисунок 6) буде відбуватися клинодуальний знос, що спричиняє зменшення й загальної довжини колодки AB .

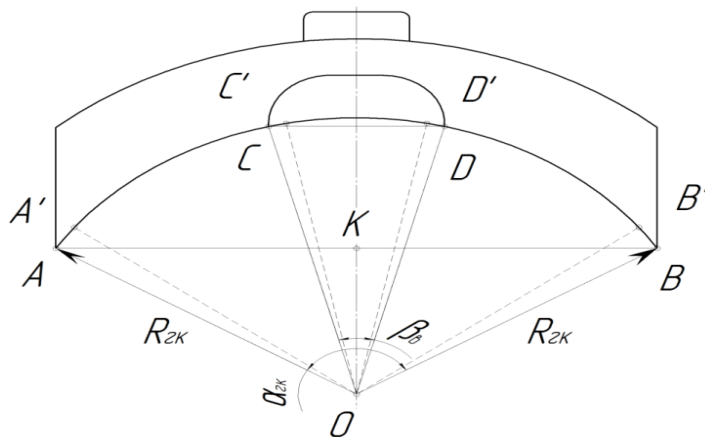


Рисунок 6 – Розрахункова схема КГК типу 2ТР-11:

AB – загальна довжина колодки; AK – довжина верхньої частини колодки; KB – довжина нижньої частини колодки; CD – довжина виїмки колодки; α_{zk} – кут, який утворюється між центром і двома кінцями колодки; β_b – кут, який утворюється між центром і двома кінцями виїмки колодки; R_{zk} – радіус робочої (гальмової) частини колодки

Через зменшення довжини AK ефективна площа поверхні колодки Q_{ef} у

верхній частині буде зменшуватися. Проте в нижній частині площа Q_{ef} буде збільшуватися до визначеного зносу, який прямо пропорційний пробігу вагона. Також буде змінюватися в менший бік і кут $\alpha_{зк}$, який утворюється між центром мас колодки та двома її кінцями.

З урахуванням усередненого зносу визначено площу робочої поверхні колодки за розробленою методологією. За результатами виконаних розрахунків графічно сформовано залежність робочої (гальмової) площі клинодуально зношеної колодки (рисунок 7) і коефіцієнта клинодуальності (рисунок 8), які залежать від пробігу вантажного вагона. Величина коефіцієнта клинодуальності показує, яка частина робочої поверхні колодки використовується під час гальмування вагона, що дає змогу з більшою точністю оцінити гальмову ефективність поїзда.

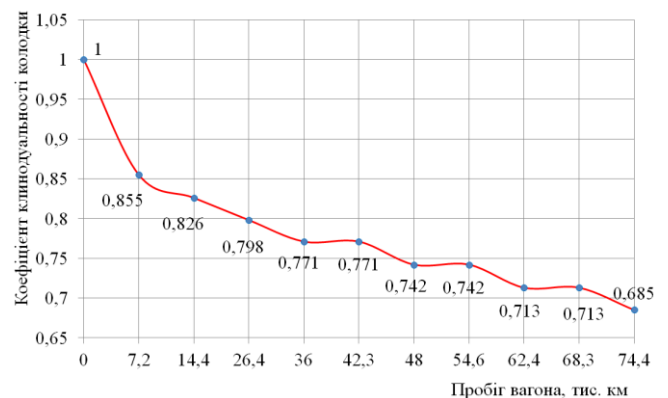
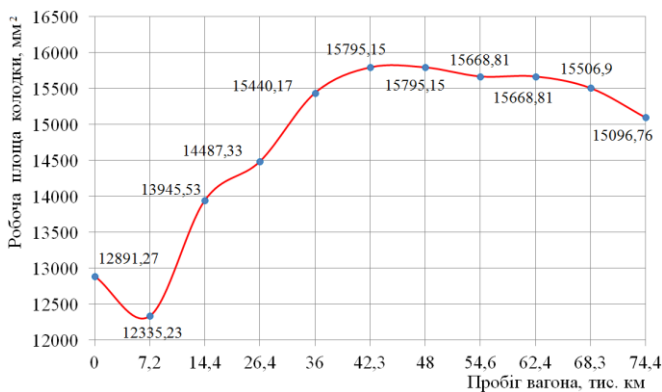


Рисунок 7 – Залежність робочої площі клинодуально зношеної колодки від пробігу вагона
Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта клинодуальності колодки від пробігу вагона

Для верифікації отриманих результатів проведено відповідні розрахунки. Встановлено, що гіпотеза про адекватність підтверджується за F -критерієм.

З метою визначення геометричних параметрів корисної площі контакту колодки за утвореної верхньої шкідливої стертості визначено довжину дуги $\cup A'B$ (рисунок 9), яка дає змогу оцінити параметри колодки:

$$\cup A'B = \frac{\pi R_k \cdot \angle A'CB}{180}, \quad (3)$$

де R_k – розрахунковий радіус колеса вагона, м.

Визначено координати точок A, K, K', N' шляхом використання координатного методу (рисунок 9). Положення точок A, K пов'язані з початковими параметрами системи «маятникова підвіска – башмак – гальмова колодка», початкової товщини колодки, величини зносу $l_{зп}$, розмірів башмака, зносу маятникової підвіски в зонах контакту з башмаком і боковою рамою візка.

Визначено кут β між двома векторами OA і OA' , що є кутом повороту колодки відносно точки O

$$\beta = \arccos \left(\frac{x_A \cdot x_{A'} + z_A \cdot z_{A'}}{\sqrt{(x_A^2 + z_A^2)} \sqrt{(x_{A'}^2 + z_{A'}^2)}} \right). \quad (4)$$

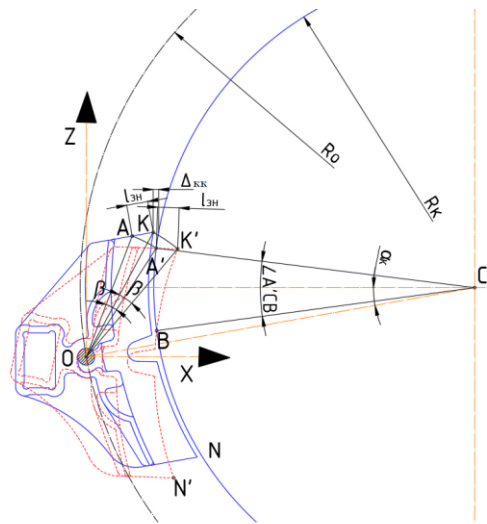


Рисунок 9 – Теоретична схема повороту башмака з колодкою відносно маятникової підвіски

Координати точок K' , N' визначено за відомого кута β і початкових точок K , N . На підставі проведених теоретичних розрахунків з урахуванням відомого кута β отримано

$$\angle A'CB = \arccos \left(\frac{|(z_C - z_{A'}) (z_C - z_B) + (x_{A'} - x_C) (x_B - x_C)|}{\sqrt{(z_C - z_{A'})^2 + (x_{A'} - x_C)^2} \cdot \sqrt{(z_C - z_B)^2 + (x_B - x_C)^2}} \right). \quad (5)$$

Знаючи кут $\angle A'CB$, за формулою (3) визначено довжину дуги. Усі наведені рівняння розв'язано за допомогою програмного комплексу MathCAD.

На підставі отриманих результатів виконано порівняння довжин шкідливої стертості КГК за відомого її горизонтального зносу зверху й зазора між колесом і колодкою в програмних комплексах AutoCAD і MathCAD для випадку горизонтального зносу 12 мм і різних зазорів (рисунок 10).

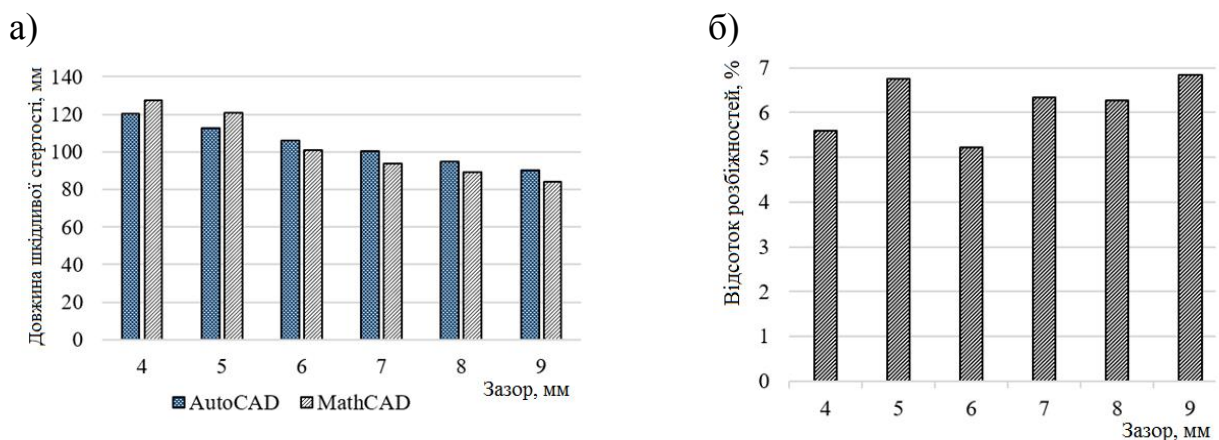


Рисунок 10 – Результати визначення довжини шкідливої стертості:

а) залежність довжини шкідливої стертості від зазора; б) відсоток розбіжності між результатами розрахунків, отриманими в AutoCAD і MathCAD

За результатами виконаних досліджень побудовано графічні залежності довжини шкідливої стерстості $l_{уст}$ (рисунок 11) від величини зазора між колесом і колодкою $\Delta_{кк}$ за відомого горизонтального зносу верхньої частини колодки.

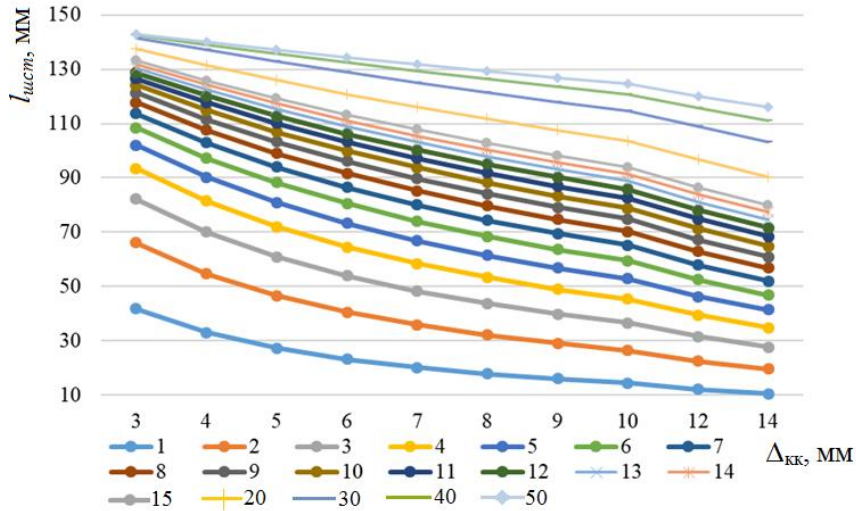


Рисунок 11 – Залежності довжини шкідливої стерстості за відомого горизонтального зносу верхньої частини колодки й зазора між колесом і колодкою

Визначення площі нерівномірного зносу КГК вантажного вагона здійснено як для криволінійної трапеції (рисунок 12). Для цього складено рівняння прямої, що проходить через точки A' , K' ,

$$\frac{x - x_{A'}}{x_{K'} - x_{A'}} = \frac{z - z_{A'}}{z_{K'} - z_{A'}}, \text{ або } z = \frac{(x - x_{A'})(z_{K'} - z_{A'})}{x_{K'} - x_{A'}} + z_{A'}. \quad (6)$$

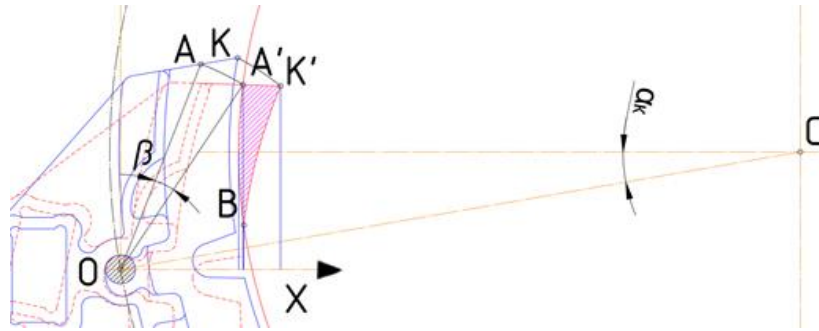


Рисунок 12 – Розрахункова схема визначення площі нерівномірного зносу КГК

Тоді площа нерівномірного зносу колодки визначається за виразом

$$Q_{ск} = \int_{x_{A'}}^{x_{K'}} \left(\frac{(x - x_{A'})(z_{K'} - z_{A'})}{x_{K'} - x_{A'}} + z_{A'} \right) dx - \int_{x_B}^{x_{K'}} \left(\sqrt{(R_K + \Delta)^2 - (x - x_D)^2} + z_D \right) dx - \int_{x_{A'}}^{x_B} \left(\sqrt{R_K^2 - (x - x_C)^2} + z_C \right) dx + \int_{x_C - R_K}^{x_{A'}} \left(\sqrt{R_K^2 - (x - x_C)^2} + z_C \right) dx. \quad (7)$$

Розроблено метод для визначення геометричних параметрів корисної площі контакту КГК за утвореної верхньої шкідливої стерстості залежно від різних зазорів між колесом і колодкою. За результатами розрахунків встановлено, що небажана шкідлива стерстість верхніх кінців колодки не тільки зменшує ефективну площу прилягання колодки до колеса в режимі гальмування, а й створює передумови

виникнення біфуркацій у гальмових підсистемах вантажних візків з важільною передачею. Тому у візках вагонів, де площа стертості верхньої частини колодок стає близькою до залишку робочої площі колодки, можуть виникати біфуркації короткочасових «перескоків» напрямку дії сили натискання колодки на колесо з наступним подовженням шкідливої стертості.

У **третьому розділі** виконано дослідження навантаженості КГК за умови високотемпературного впливу від поверхні кочення коліс вантажних вагонів.

Розрахунок реалізований на прикладі КГК з клинодуальним зносом для вагона з пробігом 74,4 тис. км, яка мала такі параметри: товщину верхнього кінця 10 мм; товщину по лінії розмежування площин 27 мм; товщину нижнього кінця 20 мм і довжину шкідливої стертості у верхній частині колодки 85 мм. Ці параметри визначено на підставі натурних досліджень.

З метою визначення допустимого питомого тиску на КГК за умови забезпечення її міцності виконано її розрахунок. До уваги прийнято дві колодки. Величина питомого тиску на колодки прийнята постійною за умови забезпечення ефективності гальмування. Перша колодка працювала в ГСВ з працездатним пристроєм рівномірного зносу й зношувалася моністично зі збільшенням робочої площі до 20000 мм². Інша колодка через непрацездатний пристрій ГСВ зношувалася клинодуально, тому зменшувалася її робоча площа до величини 15097 мм² за пробігу вантажного вагона 74,4 тис. км (рисунок 13).

Отримані результати дають змогу зробити висновок, що за незначного пробігу вагона до 21 тис. км величина питомого тиску на рівномірно зношені КГК перевищує допустимий.

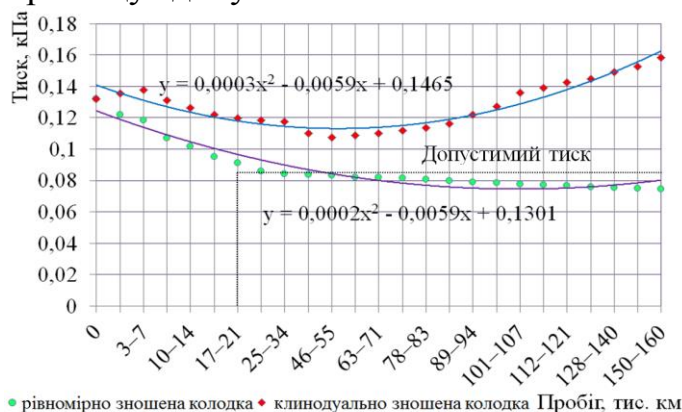


Рисунок 13 – Залежність питомого тиску на КГК з урахуванням пробігу вагона

вагона до його завершення значно перевищує допустимий, що негативно впливає на поверхню кочення коліс під час гальмування поїзда.

З метою визначення термонапруженого стану КГК за умови високотемпературного впливу від поверхні кочення коліс виконано розрахунки теплових режимів за експлуатаційних навантажень. Як приклад обрано колодки, що мали рівномірний і клинодуальний тип зносу з площею 20000 мм² і 15097 мм² за пробігу вагона 74,4 тис. км. Проведено аналіз температурних режимів за максимального натиснення на КГК. Встановлено, що величина натиснення на колодку зі зносом є меншою на 25,5 % порівняно з колодкою, яка має рівномірний

Однак зі збільшенням пробігу вагона за працездатних пристроїв у колодках через конструктивні їх особливості поступово буде збільшуватися робоча площа, що дає змогу питомому тиску знаходитися у відповідних границях. Проте слід звернути особливу увагу на клинодуально зношені КГК, у яких через непрацездатний пристрій, питомий тиск у колодках від початку експлуатаційного періоду вантажного

знос. Це обумовлено зменшенням робочої площі колодки. Результати розрахунків наведені на рисунку 14.

З метою забезпечення ефективності гальмування величина натиснення на клинодуально зношену колодку може дорівнювати тій, що притаманна для колодки з номінальними параметрами. За рахунок меншої робочої площі колодки відбувається зростання її температурної навантаженості під час гальмування (рисунок 15).

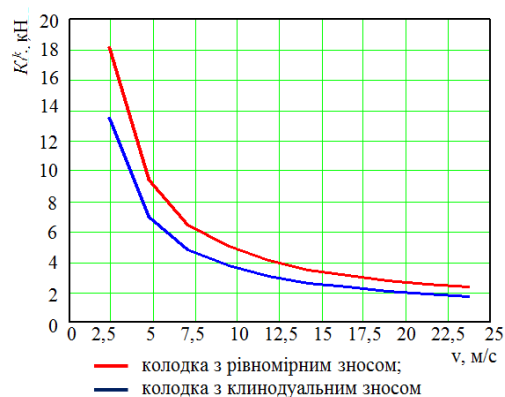


Рисунок 14 – Залежність величини натиснення КГК від швидкості руху під час гальмування

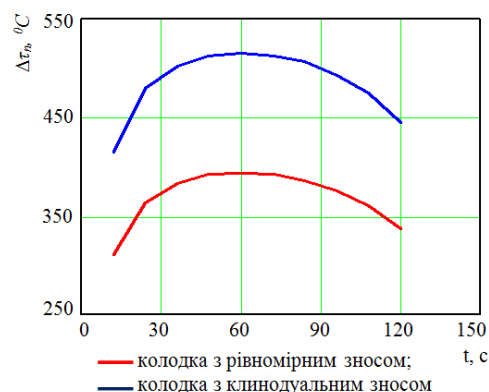


Рисунок 15 – Зміна температури нагрівання КГК за часом під час гальмування

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що температура нагрівання КГК з клинодуальним зносом збільшується на 16,8 % порівняно з колодками, що мають рівномірний знос.

На підставі виконаних досліджень визначено, що зміна температури нагрівання КГК за швидкістю має враховувати змінне значення гальмової сили, яке впливає на величину сили натискання колодки під час гальмування. Тому залежно від площі контакту триботехнічної пари «гальмова колодка-колесо» змінюється й температура нагрівання КГК за пройдений гальмовий шлях поїздом у встановлений проміжок часу. Розрахунок виконано на прикладі колодки з номінальними параметрами і клинодуально зношеної. Результати розрахунку наведено на рисунку 16.

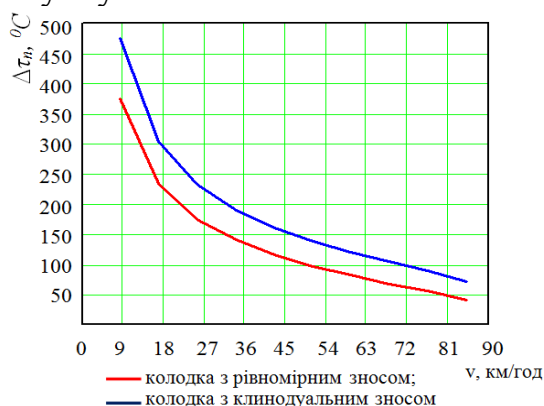


Рисунок 16 – Зміна температури нагрівання КГК за швидкістю під час гальмування

Отримані результати дають змогу зробити висновок, що з урахуванням наявності клинодуального зносу КГК збільшується й температура її нагрівання під час гальмування порівняно з колодкою, що має номінальні значення, на 16,7 %.

З метою визначення температурного впливу від КГК на колесо проведено дослідження його термонапруженого стану. Розрахунок реалізовано за методом скінчених елементів (МСЕ) у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Як розрахунковий застосовано критерій Мізеса. Враховано, що

колесо навантажується зусиллям від КГК, яке відповідає середньому режиму роботи повітророзподільника ум. № 483-000 і складає 35 кН. Максимальні напруження зафіксовано на поверхні кочення колеса, які склали 701,9 МПа, що нижче за допустимі на 12 %. Допустимі напруження при цьому прийняті рівними межі плинності матеріалу, тобто 800 МПа. Тому міцність колеса забезпечується.

Проведено розрахунок і стосовно інших режимів роботи повітророзподільника. За результатами розрахунку встановлено, що напруження в колесі при визначенні його термонапруженого стану залежать перш за все від температурного впливу, який для всіх варіантів розрахунків був прийнятий 400 °С.

За результатами досліджень визначено, що на практиці величина температурного навантаження може перевищувати 400 °С, що зумовлено багатьма факторами, наприклад, технічним станом колодки або колеса, завантаженістю вагона тощо. Для визначення допустимої температури з точки зору забезпечення міцності колеса проведено варіаційні розрахунки. Визначено допустимий з точки зору забезпечення міцності колеса температурний вплив на нього під час гальмування. При цьому допустима величина температури на колесо склала 452 °С.

Слід зазначити, що внаслідок конструкційних особливостей ГВП візка і експлуатаційних режимів може мати місце нерівномірне навантаження КГК, що може призвести до її руйнування. Для визначення міцності колодки з урахуванням її нерівномірного навантаження проведено відповідні дослідження. При цьому колодку розглянуто у вигляді стрижневої системи, як брус на двох опорах. За розрахункову схему прийнято криволінійну вісь, яка проходить через центр тяжіння (ЦТ) перерізу колодки. У зв'язку з тим, що колодка являє собою арку з кривим нелінійним обрисом малої кривизни, розрахунок здійснено як для балок з прямою віссю. Оскільки вплив довільних сил збільшується в пологих арках, тому для бруса зі стрілою підняття $f < l_{заг}/3$ впливом повздовжніх сил не нехтуємо (рисунок 17).

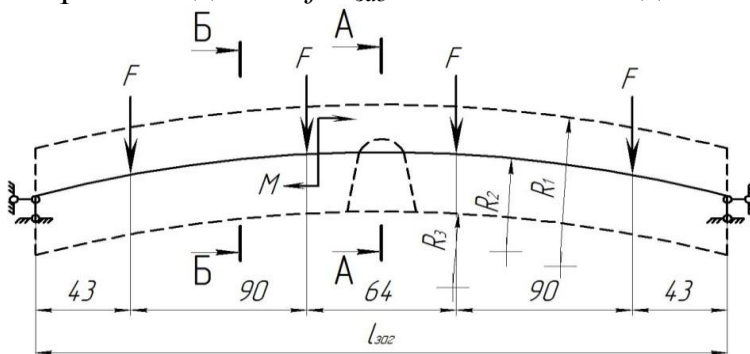


Рисунок 17 – Розрахункова схема КГК:

$l_{заг}$ – довжина колодки; F – сила, що діє на колодку; M – згинальний момент; R_i – радіуси колодки в її відповідних перерізах

За розрахункову вісь приймаємо нейтральну вісь, яка з'єднує ЦТ перерізів колодки. Через те, що більша частина колодки має постійний переріз, для визначення її радіуса положенням ЦТ перерізу А-А (рисунок 17) нехтуємо.

Для визначення положення ЦТ перерізу Б-Б колодки визначено радіус колодки для розрахункової схеми. Поперечний переріз розбито на елементарні фігури, для яких розраховано їх координати ЦТ, статичні моменти складових

Враховано, що колодка сприймає силу, яка передається на неї від башмака, силу тертя, а також температурний вплив від її взаємодії з колесом. На початковому етапі розрахунку припускаємо, що колодка сприймає силу, яка діє на неї від башмака, і силу тертя. Напрямок навантажень, які діють на колодку, співпадає з напрямком її осі.

перерізів відносно довільно вибраної осі X , а також осьовий момент інерції перерізу колодки I , що дало змогу визначити жорсткість балки при згині (рисунок 18).

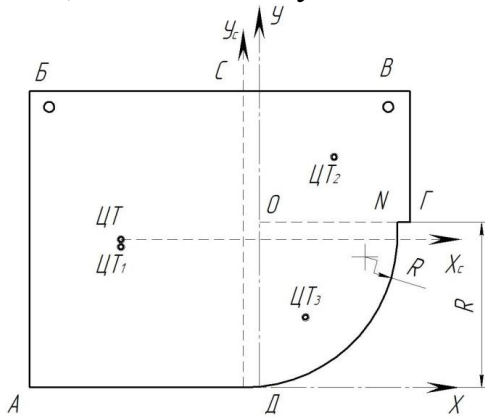


Рисунок 18 – Схема перерізу КГК і положення ЦТ:
 R – радіус колодки

Далі визначено загальні осьові моменти інерції для відповідних перерізів колодки з урахуванням поправкового коефіцієнта для сталі, який урахує збільшення жорсткості металу через композит. Основну систему колодки з невідомим розпором X_1 наведено на рисунку 19. Аналізуючи її, можна дійти висновку, що вона є один раз статично невизначеною. Для її розв'язання використовуємо класичний метод сил, канонічне рівняння якого записуємо як

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1f} = 0, \quad (8)$$

де δ_{11} – одиничний коефіцієнт; Δ_{1f} – вантажний член.

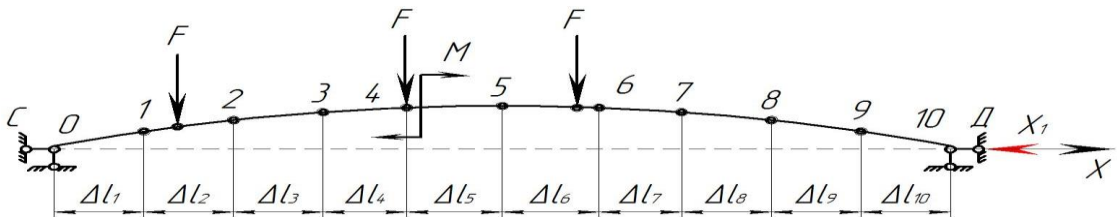


Рисунок 19 – Основна система колодки для визначення невідомих канонічних рівнянь:

Δl_i – довжина ділянки колодки, $\Delta l_i = \Delta X$

Позначивши через $I_0 = I_{A-A}$ момент інерції в перерізі $A-A$, з використанням формули Мора отримаємо вирази, у яких для визначення невідомих δ_{11} і Δ_{1f} здійснено інтегрування:

$$EI_0\delta_{11} = \int_0^s y^2 \frac{I_0}{I} dS + \int_0^s \cos^2 \varphi \frac{I_0}{A} dS, \quad (9)$$

$$EI_0\Delta_{1f} = -\int_0^s yM_0 \frac{I_0}{I} dS + \int_0^s Q_0 \sin \varphi \cos \varphi \frac{I_0}{I} dS, \quad (10)$$

де $I_0 = I_{A-A}$; I – у перерізі в i -й точці; A – площа перерізу в i -й точці; M_0 , Q_0 – балкові сили.

Аналітичний розрахунок інтегралів (9) і (10) є складним, тому його замінюємо числовим. Для оцінювання внутрішніх напружень колодки вісь арки розбито на довільно малі однакові ділянки довжиною ΔX і визначено зусилля всіх величин для середини кожної ділянки. Оскільки на брус діють зовнішні навантаження у вигляді зосереджених сил і згинального моменту, розглянемо схему у вигляді криволінійного бруса з зовнішніми зосередженими силами і видаленим згинальним моментом. Зусилля від зовнішнього вертикального навантаження можуть

виражатися через балкові сили.

На підставі визначення моментів інерції та моментів опору перерізу знайдено відповідні параметри колодки в довільних її точках, які є найбільш небезпечними. Побудовано епюри згинального моменту, поперечної та повздовжніх сил (рисунок 20).

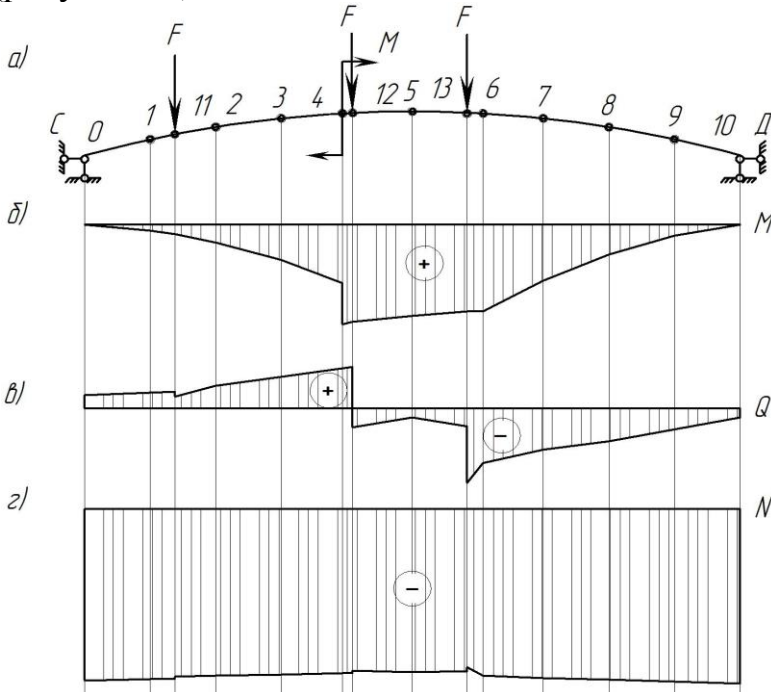


Рисунок 20 – Епюри згинальних моментів, поперечних і повздовжніх сил, що діють на КГК:
а) розрахункова схема; б) епюра згинального моменту; в) епюра поперечної сили; г) епюра повздовжньої сили

З урахуванням проведених розрахунків за значень $F=20,55$ кН, $M=68,8$ кН·м встановлено, що напруження, які виникають у КГК, дорівнюють 21,1 МПа. Тобто отримана величина напружень перевищує допустиме значення 15 МПа. Для верифікації запропонованого методу проведено розрахунок напруженого стану колодки за МСЕ, реалізованого в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Як прототип обрано КГК типу 2ТР – 11, яка застосовується в ГСВ інноваційних вантажних вагонів. Матеріал колодки – композит, який має лінійні пружні ортотропні властивості.

Під час складання розрахункової схеми враховано, що на робочу частину колодки діє горизонтальне навантаження, значення якого бралось залежно від режиму роботи повітророзподільника. Також модель урахує силу тертя. Розрахунок на міцність колодки здійснено за критерієм Мора-Кулона, тобто теорією внутрішнього тертя. Відомо, що цей критерій прогнозує виникнення відмов, якщо для поєднання максимуму головного напруження при розтягненні та мінімуму головного напруження при стисканні перевищені відповідні межі напружень. Результати розрахунків наведено на рисунку 21.

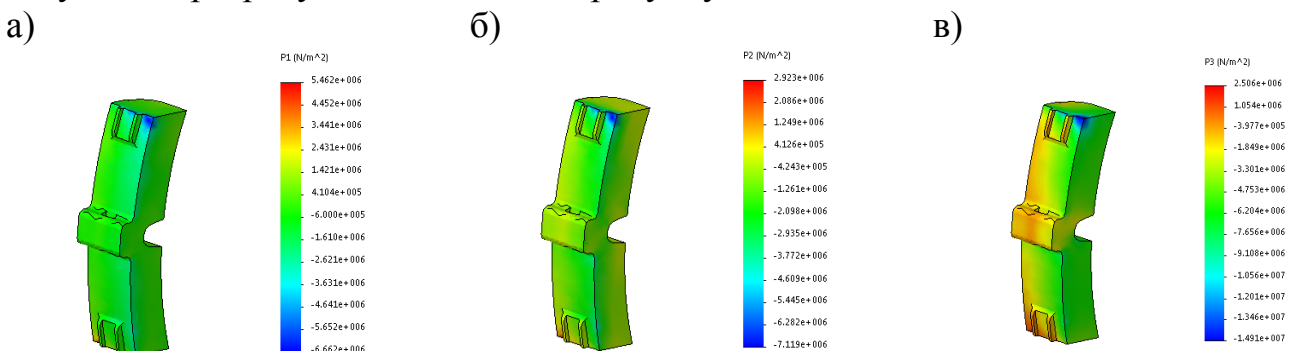


Рисунок 21 – Головні напруження, які виникають у КГК типу 2ТР – 11:
а) перше; б) друге; в) третє

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що максимальні напруження виникають у верхній частині колодки в зоні взаємодії спинки з боковиною і складають 14,9 МПа, що не перевищує допустимі.

З метою визначення полів розподілення напружень у КГК проведено її розрахунок на міцність з урахуванням нерівномірного навантаження за МСЕ. Для оцінювання міцності колодки враховано навантаження, ідентичні до тих, які діють на неї з номінальними параметрами. Результати розрахунків наведено на рисунку 22.

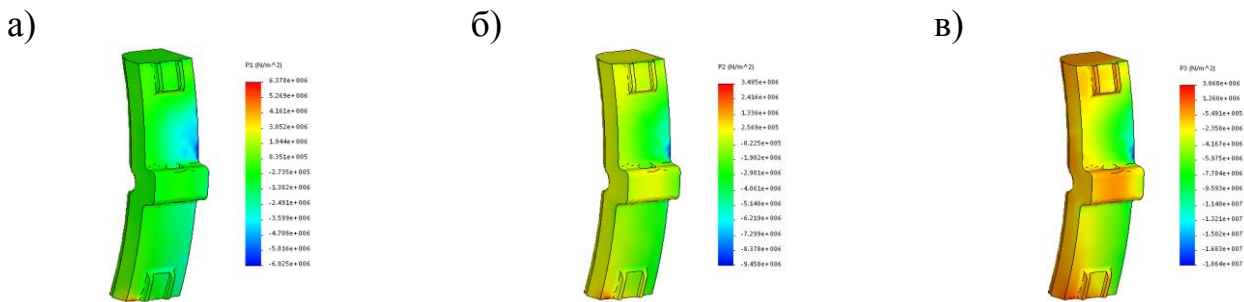


Рисунок 22 – Головні напруження, які виникають у ненормативно зношеній КГК типу 2ТР – 11: а) перше; б) друге; в) третє

Встановлено, що максимальні напруження мають місце для III головного напруження і складають близько 19 МПа. Ці напруження на 21 % більше за допустимі і виникають у спинці колодки. Отже, міцність колодки при дії статичних сил не забезпечується, і необхідності в проведенні термічного розрахунку немає. При цьому розбіжність між результатами розрахунку, отриманими математичним і комп'ютерним моделюванням, склала близько 9 %.

Запропонований математичний апарат дає змогу з урахуванням знайдених значень напружень, які діють на КГК, здійснити оптимізацію її геометричних параметрів за моментом опору. Виконані дослідження доводять негативний вплив ненормативного зносу КГК, який впливає не тільки на ефективність гальмування, а й на їх міцність.

У **четвертому розділі** проведено теоретичне обґрунтування модернізації ГСВ вантажних вагонів.

З метою запобігання нахилу колодок проведено теоретичний аналіз роботи ГСВ. Визначено зусилля в елементах ГВП, що пов'язано з її конструктивними особливостями щодо надмірної інтенсивності зносу КГК. Виконано дослідження схеми-моделі (рисунок 23, а) без введення допоміжних пристроїв і суттєвих змін у конструкції типового триангеля для прийняття рішень стосовно зменшення ненормативного зносу колодок. Розрахункова схема розглянута у вигляді безінерційної «ідеальної», тобто маса триангельної конструкції дорівнює нулю (рисунок 23, б), що сприяє зменшенню базового значення натиснень колодок на поверхні кочення коліс і відповідає очікуваному зменшенню інтенсивності їх зносу. Теоретично розглянуто роботу ГВП, де, за ідеальним міркуванням, до єдиної прямої (вісь підвішування триангеля) приведено його центр мас і вузол з'єднання розпірки триангеля з вертикальним (ведучим) важелем (рисунок 23, в). У цьому випадку

отримано позитивний результат щодо розрахунків силових дій в усіх ланках триангельної системи ГВП.

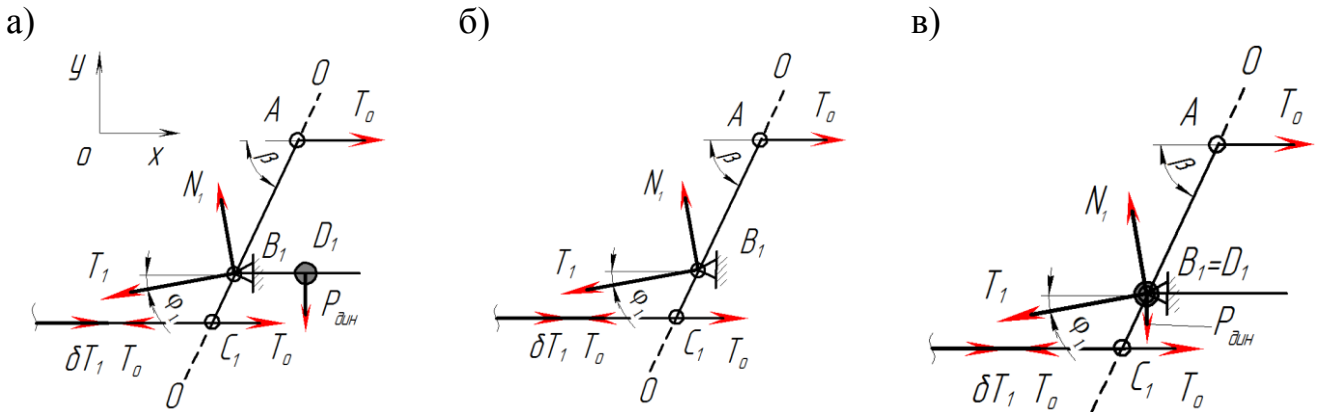


Рисунок 23 – Схеми розрахункових моделей передавання зовнішнього зусилля $T_0(t)$: а) інерційна зі зміщенням центра ваги триангеля C ; б) безінерційна «ідеальна»; в) інерційна «ідеальна»; $N_1 (X_1, Z_1)$ і $N_2 (X_2, Z_2)$ – сили в маятникових підвісках триангелів (зовнішні); T_1 і T_2 – зовнішні гальмові реакції; $\delta T_2 = -\delta T_1$ – розпирні внутрішні «віртуальні» сили; $P_{дин}$ – динамічна сила, що спричиняє нахил триангеля

На підставі проведених розрахунків можна зробити висновок, що без теоретичного уточненого аналізу роботи триангельних ГВП пошукові конструктивні рішення дають розбіжності у спробі зменшити шкідливо діючий крутний момент $M_{кр}$. За результатами удосконалення елементів ГВП візка, модернізовані триангелі під час роботи працюють більш ефективно за типові переважно за рахунок дії гальмового зусилля $T_0(t)$, як прийнято під час гальмування.

За теоретично-розрахунковим методом аналізу роботи ГВП складено рівняння статичної рівноваги ГВП у фазах пересування окремої колісної пари візка: без гальмування – фаза 0, під час гальмування з переміщенням – фаза 1 і за відсутності будь-якого руху – фаза 2.

Розглянуто план положень ГВП під час гальмування у фазі 2 для візка вантажного вагона мод. 18-100. З використанням програмного забезпечення MathCad знайдено силові фактори, які діють в елементах ГВП візка (таблиця 1).

Таблиця 1 – Результати розрахунку зусиль, які діють в елементах ГВП

| Розрахункова схема ГВП | T_1 , кН | T_2 , кН | N_1 , кН | N_2 , кН |
|----------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Типова | 46,0 | 46,0 | - | - |
| Безінерційна «ідеальна» | 45,53 | 45,53 | 8,03 | 8,03 |
| Інерційна «ідеальна» | 40,97 | 40,97 | 7,13 | 7,13 |
| Інерційна зі зміщенням центра ваги триангеля | 47,4 | 47,4 | 9,8 | 9,8 |

Отримані розрахунки доводять, що конструктивні зміни ГВП, які відображають розглянуті схеми-моделі, мають суттєвий розбіг щодо визначених силових навантажень елементів триангельних ГВП. Встановлено, що простим раціональним рішенням, яке можна використовувати при «раціоналізації» умов роботи системи гальмування візка, можна вважати перенесення технологічного

отвору розпірки триангеля. Це здійснюється технічно доступним й економічно доцільним способом в умовах вагоноремонтного підприємства й не потребує значних капітальних вкладень. Також позитивним кроком у конструктивному удосконаленні ГВП є зниження загальної маси триангеля з його елементами й динамічне врівноваження його конструкції, пов'язане з пошуком раціонального місця знаходження його центра мас.

Слід зазначити, що запропоновані заходи з модернізації елементів ГВП візків вантажних вагонів виконано з метою усунення конструктивних недоліків у системі відведення КГК від поверхонь кочення колісних пар. Розроблено пристрій для механічної ГСВ за технологією УкрДАЗТ (2012 р.) для рівномірного зносу колодок вантажних вагонів (рисунку 24). У цьому пристрої шарнір Б, приєднання вертикального важеля до розпірки триангеля, розташований на одній прямій А-А з шарнірами маятникових підвісок. Криволінійний стрижень у ковзунах утримує ГВП постійно в рівновазі, що забезпечує строго рівномірні зазори між колесами та колодками та їх рівномірний знос.

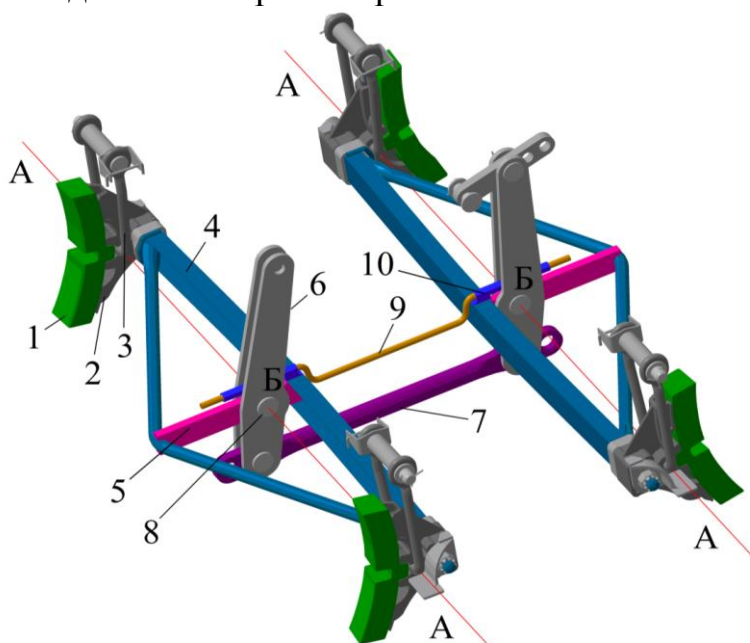


Рисунок 24 – Модернізована ГВП, розроблена за технологією УкрДАЗТ:

- 1 – колодка; 2 – башмак; 3 – маятникова підвіска; 4 – триангель; 5 – розпірка; 6 – важіль; 7 – затяжка важелів; 8 – шарнірне з'єднання вертикальних важелів з розпіркою; 9 – криволінійний стрижень; 10 – циліндричний ковзун

розробленою за технологією УкрДАЗТ, довели, що пошкоджень і зносів в експлуатації на пристроях не виявлено (рисунку 25). Отримані величини зносу КГК у дослідних вагонах засвідчили, що імовірність їх терміну служби до пробігу вагонів є не менше 210 тис. км. Отже, ресурс КГК забезпечує міжремонтний період експлуатації вагона з урахуванням періодичних регулювань ГВП візків.

Для верифікації запропонованої конструкції проведено ФЕМ-аналіз елементів ГВП візка вантажного вагона, модернізованого за технологією УкрДАЗТ, реалізованому в програмному комплексі SolidWorks Simulation. За результатами розрахунку встановлено, що максимальні еквівалентні напруження виникають у струні та складають 163,9 МПа, тобто не перевищують допустимі. Максимальні переміщення зафіксовані у КГК – 5,7 мм. Отже, міцність модернізованої ГВП візка забезпечується.

Виконані експериментальні дослідження дослідних напіввагонів, побудованих ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» з модернізованою ГВП,

За результатами обстеження модернізованої ГВП, розробленої за технологією УкрДАЗТ, було оброблено статистичні величини зносу верхніх і нижніх частин КГК як найбільш зношених за пробігу 121,3 тис. км напіввагонів (рисунок 26).

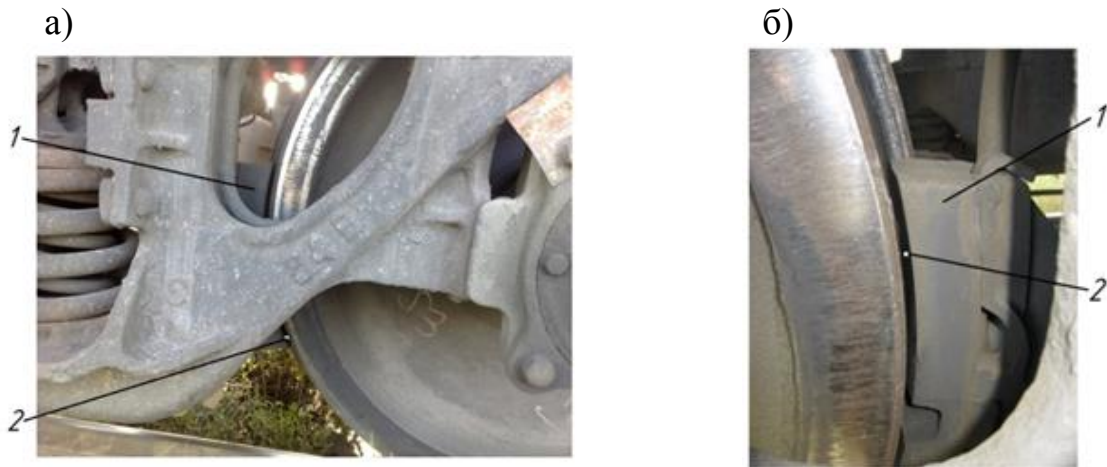


Рисунок 25 – Технічний стан триботехнічної пари дослідного напіввагона після пробігу 121,3 тис. км:

- а) рівномірний знос колодки; б) нормативний зазор між елементами триботехнічної пари; 1 – КГК; 2 – зазор між колодкою і колесом

З гістограм видно, що маємо досить великий діапазон величин зносу КГК – від мінімального значення 14 мм до максимального 32 мм. Це свідчить про те, що на інтенсивність зносу колодок впливає велика кількість різноманітних факторів, які потребують проведення додаткових досліджень.

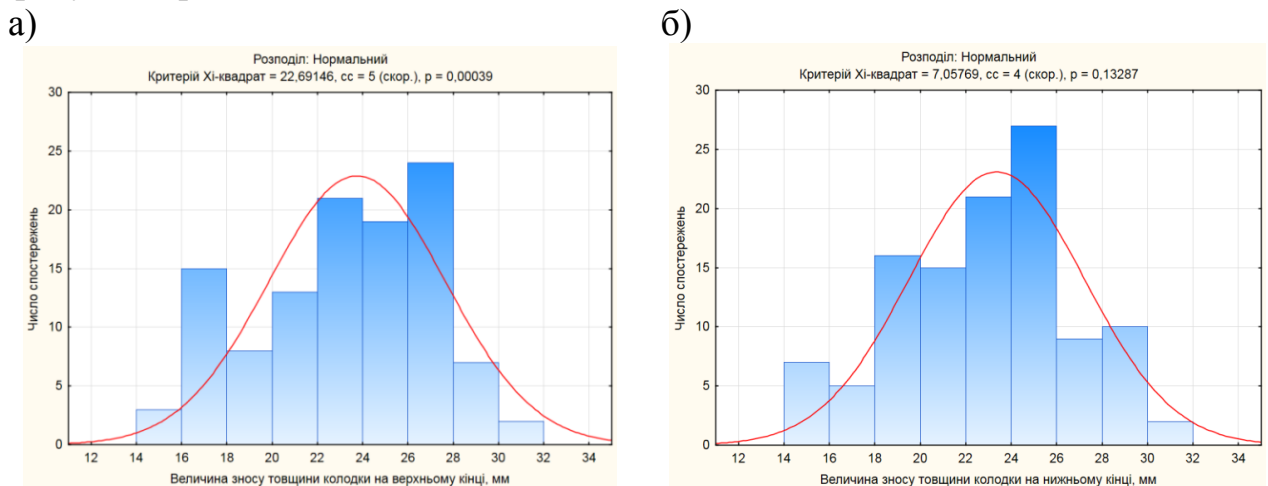


Рисунок 26 – Результати обробки статистичного матеріалу стосовно зносу КГК за пробігу вагонів 121,3 тис. км:

- а) верхня частина колодки; б) нижня частина колодки

На підставі експлуатаційних випробувань можна зробити висновок, що перенесення отвору в розпірці триангеля на одну вісь з кінематичними вузлами маятникових підвісок гальмових башмаків і застосування прямого криволінійного стрижня ліквідує шкідливо діючий крутний момент, на триангелі. Це позитивно впливає на знос КГК, роботу важільної передачі в цілому та покращує БР поїздів на залізничному транспорті.

У п'ятому розділі здійснено прогнозування залишкового ресурсу колодок модернізованих ГВП візків вантажних вагонів.

Під час обстеження модернізованих ГВП, розроблених за технологією УкрДАЗТ, в умовах експлуатації вантажних вагонів отримані величини зносу КГК. Для їх обробки використано методи математичної статистики, які дали змогу спрогнозувати залишковий ресурс КГК залежно від пробігу вагона в експлуатації. Прогнозування залишкового ресурсу КГК виконано з використанням різних моделей, які розглянуто на відповідному етапі досліджень.

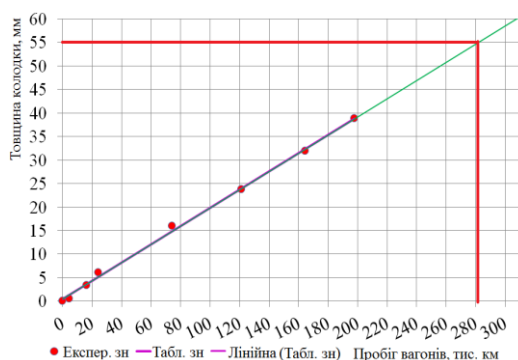
На першому етапі для прогнозування залишкового ресурсу колодок за їх граничної товщини використано регресійний аналіз. Для отримання достовірної залежності зносу колодок від пробігу вагонів сформульовано лінійну модель регресійного аналізу, яка описує процес зносу колодок під час гальмування і має такий вигляд:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (11)$$

де b_0 , b_1 , b_2 – коефіцієнти регресії; x_1 , x_2 – незалежні змінні.

З метою прогнозування залишкового ресурсу КГК для модернізованих пристроїв застосовано метод найменших квадратів (МНК). Результати розрахунків наведено на рисунку 27.

а)



б)

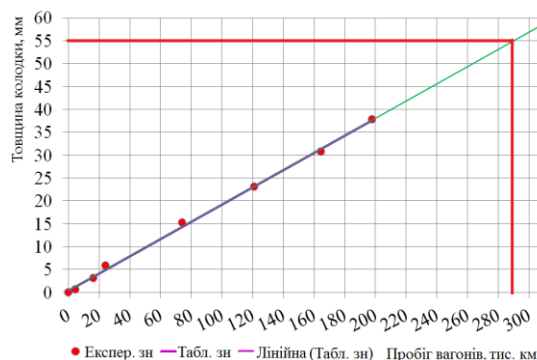


Рисунок 27 – Графік лінійної регресії з прогнозуванням залишкового ресурсу КГК залежно від пробігу вагонів з урахуванням їх середнього зносу:

а) у верхній частині колодки; б) нижній частині колодки

На підставі отриманих залежностей (рисунок 27) можна зробити висновок, що за використання модернізованих ГВП на вагоні його середній пробіг під час рівномірного зносу КГК досягає 284,57 тис. км, а ресурс збільшується приблизно у 2,59 раза. При цьому не потрібно виконувати заміну КГК у міжремонтний період експлуатації вагона за наявності модернізованих ГВП. Перевірку відповідності експериментально-теоретичних розрахунків щодо вимірювань зносу колодок оцінено за тестом Кохрена. Проте отримані результати підтверджують, що в середньому знос колодок у верхній і нижній частинах має різні значення.

На другому етапі досліджень використано методику статистичних оцінок для визначення геометрії зносу КГК залежно від пробігу вантажних вагонів, які обладнані модернізованими ГВП.

З метою визначення геометричних розмірів КГК з урахуванням застосування модернізованих ГВП використано математичну модель, розроблену Н. Ю. Ламнауер

у вигляді статистичної функції щільності $f(x)$ для випадкових величин зносу x колодок.

Аналіз ресурсних характеристик у точках перевірки зносу для визначеного пробігу вантажного вагона з модернізованими ГВП показав, що залежність між зносом і пробігом вагона близька до лінійної. Застосовано МНК і знайдено кутовий коефіцієнт η , який для зносу верхньої частини колодки дорівнює $\eta_1=5,1$, а нижньої – $\eta_2=5,27$. Знаючи залежність і розподіл зносу КГК визначено щільність розподілу випадкової величини пробігу u .

Визначено емпіричні й теоретичні оцінки інтенсивності зносу й середнього залишкового ресурсу КГК вагона з урахуванням пробігу (рисунки 28 і 29 відповідно).

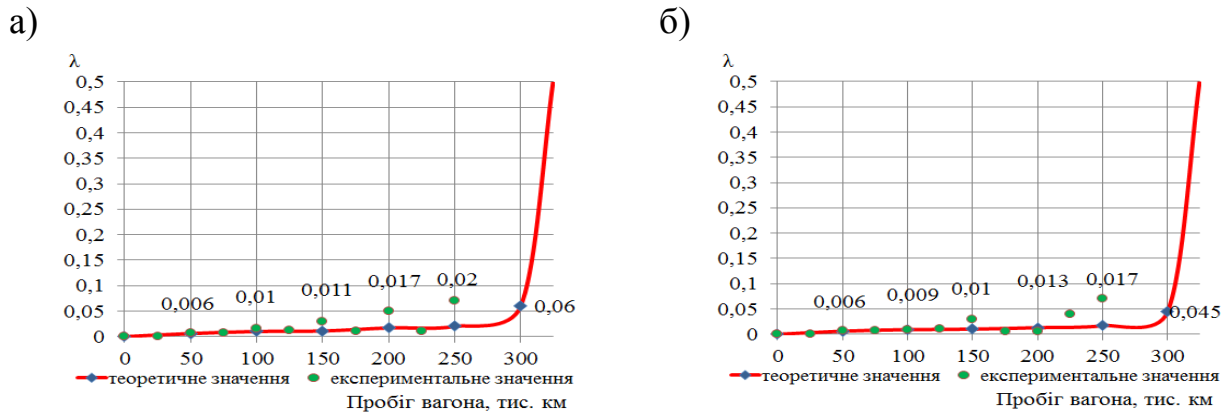


Рисунок 28 – Графіки емпіричної й теоретичної оцінки інтенсивності зносу КГК з урахуванням пробігу вагона:
а) верхня частина; б) нижня частина

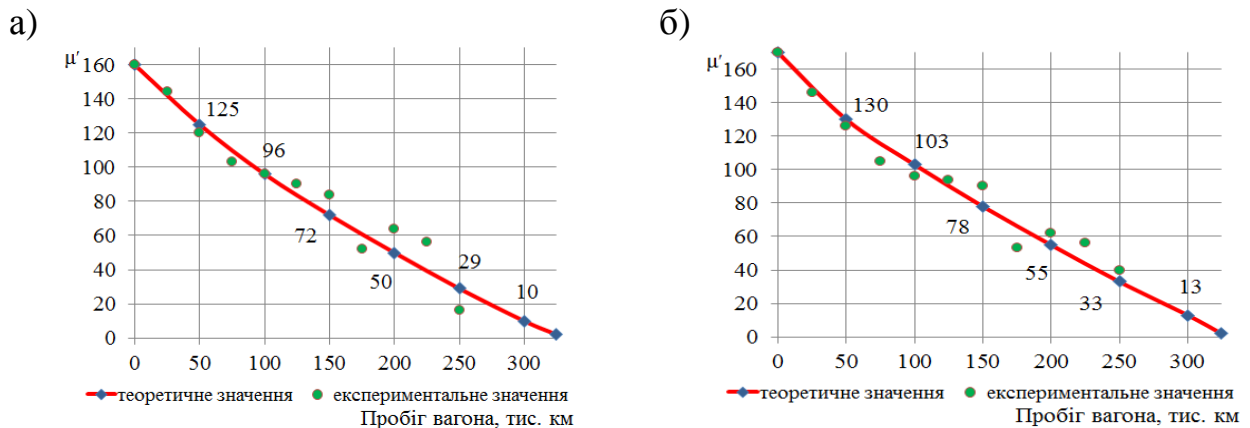


Рисунок 29 – Графіки емпіричної й теоретичної оцінки ресурсу залишкового зносу КГК з урахуванням пробігу вагона:
а) верхня частина; б) нижня частина

Аналізуючи залежності на рисунках 28 і 29, можна зробити висновок, що модель зносу колодок, з огляду на показники її адекватності для пробігу вантажних вагонів з модернізованими ГВП і врахуванням геометричних параметрів зносу КГК, доцільно застосовувати для розв'язання основних задач, пов'язаних як зі зносом будь-яких типів колодок вагонів, так і РС у цілому.

Значення інтенсивності зносу КГК вагона за величини пробігу 250 тис. км верхньої частини колодки склало $\lambda=0,02$, а нижньої – $\lambda=0,017$. Важливо зазначити, якщо вагон пройде відстань 200 тис. км, тоді середній залишковий ресурс верхньої частини КГК з урахуванням кутового коефіцієнта складе $\mu'=50,39$ мм, а нижньої $\mu'=55,13$ мм. Розрахунки показали, що поріг пробігу вагона до повного зносу КГК верхньої частини дорівнює 331,88 тис. км, а нижньої – 343,04 тис. км.

На третьому етапі досліджень за сконструйовано-оптимальними ARIMA-моделями значень здійснено прогнозування залишкового ресурсу КГК вагонів з модернізованими ГВП із 95 % довірчими інтервалами. Завдяки методології Бокса-Дженкінса встановлено, що граничний знос величиною 55 мм нижньої частини колодки модернізованої ГВП буде досягнутий за пробігу 276,6 тис. км, верхньої частини колодки – 273,3 тис. км. Результати проведених досліджень апробовано на дослідному РС з модернізованими ГВП.

У шостому розділі дисертаційної роботи запропоновано методологію визначення економічного й екологічного ефекту від застосування модернізованої ГВП, розробленої за технологією УкрДАЗТ, за розрахунковий період, адаптовану до умов експлуатації вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця» з урахуванням різного роду локомотивної тяги.

Встановлено, що використання у вантажних вагонах модернізованої ГВП візків зменшує:

- додаткові капітальні вкладення на науково-дослідницькі й дослідно-конструкторські роботи, пов'язані з науковим, технічним і технологічним розробленням пристрою ГВП, які становлять за три роки 1333,78 тис. грн;

- додаткові витрати безпосередньо на здійснення модернізації, пов'язані з демонтажно-монтажними роботами, зі встановленням на візки вантажного вагона модернізованих елементів ГВП, які становлять 1124382,8 грн у розрахунку на 103641 вантажний вагон робочого парку;

- експлуатаційні витрати через економію на закупівлю КГК вантажних вагонів, які становлять 900, 00 грн на один вагон;

- економію витрат на токарні роботи, пов'язані з відновлення поверхні кочення колісної пари одного вантажного вагона, які становлять за рік 3760,90 грн.

Оцінено питомий додатковий опір від притиснення верхніх кінців КГК до поверхонь кочення коліс під час руху поїзда з локомотивами різних типів у режимі тяги й холостого ходу за формулою

$$w_{д.г} = \frac{1000 \cdot \varphi_{кр} \cdot \sum K_{д.г}}{m_c \cdot g} = \frac{1000 \cdot \varphi_{кр} \cdot \sum K_{д.г} \cdot 4 \cdot n_g}{m_c \cdot g}, \quad (12)$$

де $\varphi_{кр}$ – розрахунковий коефіцієнт тертя колодок; $K_{д.г}$ – додаткове розрахункове притиснення колодок через недосконалу конструкції ГВП візків; n_g – кількість вагонів у складі вантажного поїзда, ваг; m_c – маса складу поїзда, т; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Визначено залежність питомого додаткового опору від притиснень КГК до коліс через недосконалу конструкції ГВП візків від швидкості руху поїзда і навантаження на вісь чотиривісного вантажного вагона у складі поїзда (рисунок 30).

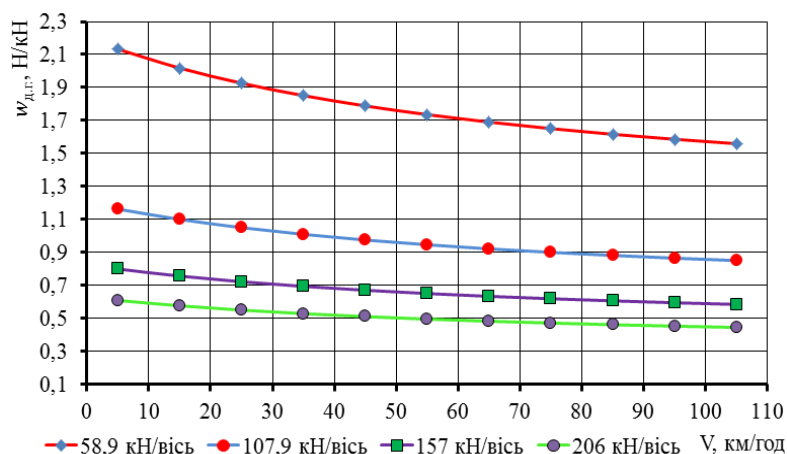


Рисунок 30 – Залежність питомого додаткового опору від притиснень КГК до коліс від швидкості руху поїзда і навантаження на вісь вагона

На підставі отриманих розрахунків можна зробити висновок, що застосування модернізованої ГВП візків забезпечує за середньої кількості фізичних вагонів у поїзді – 53,2, середньої технічної швидкості 43,2 км/год, а також середньої маси вантажного поїзда у випадку тепловозної тяги, яка складає 2505 брутто т й електровозної тяги, яка складає 3378 брутто т зменшення питомої витрати енергоресурсів залежно від виду тяги. Найбільше зменшуються витрати дизельного палива – 19,7 % у тепловозів серії 2TE116, а для інших серій локомотивів зменшення енергоресурсів відбувається в середньому на 8 %. Крім того, у результаті зменшення витрат палива на тягу поїздів очікується зменшення витрат дизельного мастила в розмірі 2,5 % витрат дизельного палива.

За результатами розрахунку визначено річну економію витрат на енергоресурси для тяги поїздів і дизельне мастило за умов застосування модернізованої ГВП в розрахунку на один вагон робочого парку, яка становить 72755 грн.

Визначено економічний ефект на робочий парк вантажних вагонів за 22 роки використання розглянутого заходу за умови, що ГСВ вантажних вагонів будуть модернізовані протягом 2023 – 2027 років і їх експлуатація розпочнеться у поточному році (рисунок 31).

З огляду на річний обсяг експлуатаційної роботи визначено економічну оцінку шкоди, якої завдають газові викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря, що становить для тепловозів серії М62 за умов застосування типової ГВП візків 200085 тис. грн і модернізованої ГВП візків 183784 тис. грн, а для тепловозів серії 2TE116 за умов застосування типової ГВП візків 257055 тис. грн і модернізованої ГВП візків 214696 тис. грн. Тобто відбувається зменшення газових викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря за рахунок використання модернізованої ГВП візків для тепловозів серії М62 на 8,14 %, а для тепловозів серії 2TE116 на 16,5 %.

Визначено річний екологічний ефект як різницю між річною шкодою, що завдається газовими викидами шкідливих речовин в атмосферне повітря тепловозом у рік розрахункового періоду під час експлуатації вантажних поїздів з типовою, і модернізованою ГВП візків (рисунок 32).

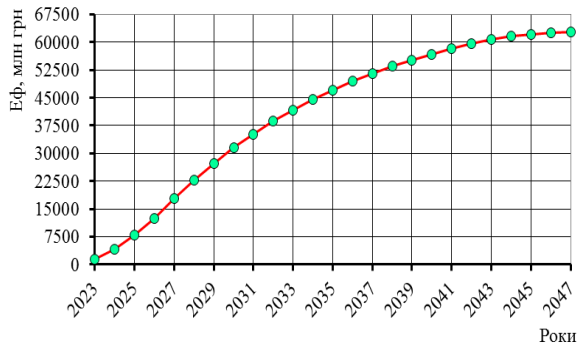


Рисунок 31 – Економічний ефект на робочий парк вантажних вагонів за роками розрахункового періоду

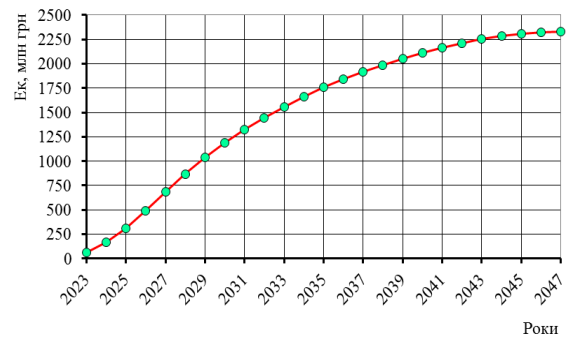


Рисунок 32 – Екологічний ефект на робочий парк вантажних вагонів за роками розрахункового періоду

На підставі виконаних розрахунків можна зробити висновок, що застосування у вантажних вагонах модернізованої ГВП візків зменшить витрати палива через усунення тертя між гальмовою колодкою та колесом під час руху поїзда, що дасть змогу зменшити кількість шкідливих речовин, які викидаються з відпрацьованими газами тепловозів у довкілля.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз стану проблеми щодо забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів. Встановлено, що цим питанням, у тому числі створенню заходів щодо забезпечення надійності елементів механічної частини гальм, досі належної уваги не приділялося.

Виконано аналіз чинних нормативних і технічних документів не виявив напрямів з новим підходом до модернізації, проектування й удосконалення елементів ГВП візків щодо запобігання ненормативному зносу колодок у вантажних вагонах. Тому актуальним стає розвиток наукових основ з забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації їх гальм, а також створення рішень стосовно удосконалень ГСВ вантажних вагонів.

2. Запропоновано класифікацію видів і типів зносу КГК, визначено особливості квазістатичного підходу до створення теорії зношування колодок у ГСВ вантажних вагонів.

2.1. За результатами комплексних обстежень КГК розроблено класифікацію їх видів і типів зносу у вигляді моністичного й клинодуального. Встановлено, що робоче тіло КГК зношується дуально з лінією розмежування двох площин тертя, тому такий стан колодок дефініційовано як клинодуальний фрикційний знос. Виконано порівняльний аналіз двох видів ненормативного зносу КГК вантажних вагонів експлуатаційного парку. Встановлено, що клинодуальний знос значно погіршує експлуатаційні властивості транспортних засобів.

2.2. Проаналізовано систему маятникового підвішування колодки за її взаємодії з колесом. При цьому визначено силові фактори, які забезпечують квазістатичну рівновагу зчленованих елементів підвішеної КГК під час гальмування візка. Це дало змогу створити передумови для вирішення проблеми, що стосується клинодуального фрикційного зносу КГК вантажних вагонів. На підставі

кінетостатичного аналізу встановлено, що моменти для верхньої і нижньої частин КГК залежать від багатьох параметрів, а їх надлишкові величини породжують утворення та інтенсивне зростання клинодуального фрикційного зносу колодок у вантажних вагонах. Визначено, що за рахунок такого зносу колодки, гальмова площа її верхньої частини буде зменшуватися зі збільшенням пробігу вагона, що негативно впливає як на оцінювання ефективності вантажного РС, так і на БР поїздів.

Наведено методику й процедуру аналітичного розв'язання задачі про квазістатичну рівновагу сил і моментів, що діють під час гальмування колеса колодковим гальмом у випадку двостороннього руху, коли мають місце однакові режими гальмування. За результатами досліджень встановлено, що для ліквідації клинодуального зносу КГК надлишковий момент має дорівнювати нулю. Визначено раціональне місце підвішування колодки, що дасть змогу позбутися будь-якого її ненормативного зносу, а також збільшити використання ресурсу колодок на весь міжремонтний період експлуатації вагона.

3. На підставі системного підходу класифіковано фактори, що впливають на працездатність і ефективність роботи ГСВ вантажних вагонів. Це дало змогу визначити негативні наслідки, які впливають на характер і причини фрикційних зносів колодок, порушення умов експлуатації ГВП, а також наносять значні збитки залізничній інфраструктурі та погіршують БР поїздів. Наведені недоліки призводять до погіршення ефективності гальмувань у поїздах, збільшують витрати енергоресурсів на тягу поїздів, зменшують ресурс КГК, пошкоджують поверхні кочення коліс і негативно впливають на довкілля.

4. Розроблено графоаналітичний метод на основі емпіричних величин шкідливого зносу КГК для визначення коефіцієнта клинодуальності залежно від пробігу вантажного вагона. Отримано нову закономірність для визначення коефіцієнта клинодуальності КГК, яка дасть змогу належно оцінити ефективність процесу гальмування вантажних поїздів. Визначено, що чисельне значення коефіцієнта клинодуальності КГК знаходиться в межах від 1,0 до 0,685. Отримані результати підтверджені шляхом комп'ютерного моделювання. Проведено верифікацію сформованих моделей за F -критерієм. Встановлено, що гіпотеза про адекватність підтверджується.

5. Сформульовано метод для визначення геометричних параметрів колодок вантажних вагонів з урахуванням наявної у верхній частині колодки шкідливої стертості, що дало змогу отримати нові залежності зносу колодок для оцінювання ефективності процесу гальмування РС. За сформульованим новим методом визначено, що чим менший зазор між колодкою і колесом і відповідно кут між поверхнею обода колеса та робочою частиною колодки, тим більша її довжина верхньої частини піддається зносу за попуцених гальм під час руху поїзда. Встановлено, що при ненормативному зазорі між колодкою і колесом, який значно більший у нижній частині, відбувається інтенсивний знос верхнього кінця колодки. Отримано числові значення дефініційованих довжин шкідливого зносу КГК за результатами комп'ютерного математичного моделювання верхньої шкідливої стертості за різних зазорів між колодкою і колесом. Встановлено, що похибка між

результатами розрахунків координатного і графічного методу становить 5 – 7 %.

6. Визначено теплові режими під час гальмування вагона на поверхні тертя триботехнічної пари «гальмова колодка – колесо» залежно від зносу КГК. Для цього виконано комплексний тепловий розрахунок КГК з номінальними параметрами, площа якої становила 20000 мм², і клинодуально зношеної колодки за пробігу вагона 74,4 тис. км, гальмова площа якої становила 15097 мм², що на 25 % менше за номінальну. Величина максимального натиснення за умови температурних режимів на клинодуально зношену колодку є меншою на 25,5 % за ту, яка діє на колодку з номінальними параметрами під час гальмування.

За умови порівняння розрахункових величин для випадку використання колодок з номінальними значеннями параметрів визначено, що зміна величини сили натискання на КГК з різними параметрами зносу під час гальмування призводить і до зміни гальмової сили. Результати отриманих розрахунків доводять, що температура нагрівання для колодок типу 2ТР-11 з клинодуальним зносом на 16,7 % є більшою, ніж для колодок з номінальними параметрами.

7. Проведено визначення термонапруженого стану КГК за умови високотемпературного впливу на поверхню кочення коліс в умовах експлуатаційних режимів.

7.1. Досліджено термонапружений стан колеса за взаємодії з клинодуально зношеною КГК під час гальмування. Встановлено, що напруження в колесі напряду залежать від температурного впливу. Проведено варіаційні розрахунки для визначення допустимої температури, з точки зору забезпечення міцності колеса. Встановлено, що величина температурного впливу на нього під час гальмування складає 452 °С. Отримані результати підтверджені комп'ютерним моделюванням.

7.2. Сформовано новий метод розрахунку КГК для визначення міцності з урахуванням її нерівномірного навантаження. При цьому колодку розглянуто як стрижневу систему, навантажену зосередженими силами та згинальним моментом. Результати досліджень довели, що напруження в колодці складають, близько 21,1 МПа і перевищують нормативну величину на 29 %. Розроблений математичний апарат дає змогу з урахуванням знайдених значень напружень, які діють на колодку, здійснити оптимізацію її геометричних параметрів за моментом опору.

7.3. Досліджено термонапружений стан КГК типу 2ТР – 11 з номінальними параметрами під час експлуатаційних навантажень. З'ясовано, що на робочу частину колодки діє горизонтальне навантаження, а також модель ураховує силу тертя. Результати комп'ютерного моделювання довели, що температура на поверхні колодки змінюється за часом гальмування. Для цього прийнято максимально допустиме значення температурного навантаження, яке прикладалося до робочої поверхні колодки. Встановлено, що максимальні напруження виникають у верхній частині колодки в зоні взаємодії спинки з боковиною, складають 14,9 МПа і не перевищують допустимі.

7.4. Проведено розрахунок на міцність КГК з урахуванням нерівномірного навантаження за МСЕ. Встановлено, що максимальні напруження виникають у спинці колодки, складають 19 МПа і перевищують нормативну величину на 21 %. Отже, міцність колодки за дії статичних сил не забезпечується.

8. Проведено теоретичне обґрунтування напряму модернізації ГСВ вантажних вагонів. Для цього використано кінетостатичні й динамічні схеми та моделі ГВП візка для відповідних розрахунків, а також узагальнення результатів досліджень математичним і комп'ютерним моделюванням. Розроблено уточнений новий науковий підхід, спрямований для методологічного оцінювання теоретичних розрахунків дійсних сил натискання КГК на колеса для запобігання клинодуальному зносу колодок. Наведено комплексні заходи, які дають змогу позбутися шкідливо діючого крутного моменту, збалансуванням триангеля в осях його підвішування за попущених гальм, під час якого колодки утримуються на нормативній відстані відносно коліс за всією своєю довжиною. Запропоновані заходи з модернізації ГВП під час виконання планових видів ремонту дають змогу підвищити довговічність елементів триангелів до 1,3 раза, а ремонтпридатність – до 100 %.

9. Виконано експериментальні випробування, за результатами яких проаналізовано вплив модернізації важільної передачі на ефективність роботи гальмової системи вантажного вагона в цілому. За результатами наукових досліджень розроблено й затверджено документацію для виготовлення модернізованої ГВП візка вантажного вагона за технологією УкрДАЗТ, на підставі якої проведено експлуатаційні випробування модернізованої ГВП на 10 дослідних вантажних вагонах, побудованих ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод». Під час обстежень встановлено, що жодних пошкоджень на дослідних ГВП візків і ненормативного зносу КГК не виявлено. Модернізована ГВП візка забезпечує рівномірне відведення колодок від коліс у вагонах під час руху поїзда. Отримані величини зносу КГК у дослідних вагонах підтверджують ймовірність їх терміну служби до пробігу вагонів не менше 210 тис. км, без заміни колодок у ГСВ.

10. Спрогнозовано залишковий ресурс КГК модернізованих ГВП залежно від пробігу вагона на підставі отриманих статистичних величин.

Отримано закономірності лінійного вигляду зносу верхньої й нижньої частин КГК залежно від пробігу вантажного вагона за рахунок застосування регресійної моделі. Це дає змогу прогнозувати ресурс КГК модернізованих ГВП на весь гарантований вагоноремонтним підприємством міжремонтний період експлуатації вантажного вагона. Виконано перевірку моделі на адекватність за F -критерієм.

Отримано закономірності для прогнозування величин зносу верхньої й нижньої частин КГК модернізованих ГВП за методикою статистичних оцінок, що дає змогу визначити уточнені геометричні параметри колодки залежно від пробігу вантажного вагона. Встановлено, що поріг пробігу вагона до повного зносу КГК верхньої частини дорівнює 331,88 тис. км, а нижньої – 343,04 тис. км.

Визначено залишковий ресурс КГК для вагонів з модернізованими ГВП за ARIMA-моделями, який теоретично сприяв збільшенню пробігу використання вагона в середньому до 274,95 тис. км. Запропоновані рішення дали змогу збільшити період експлуатації вантажних вагонів із модернізованими ГВП візків.

11. Запропоновано методологію визначення економічного й екологічного ефекту від використання модернізованої ГВП. Встановлено, що застосування модернізованої ГВП забезпечує зменшення питомих витрат палива на вимірник

експлуатаційної роботи, який залежить від застосування тепловозної та електровозної тяги й становить від 7,25 до 19,7 %. Визначено загальну річну економію експлуатаційних витрат на один вантажний вагон робочого парку АТ «Укрзалізниця», які складають 77416 грн.

Встановлено, що економічний ефект від використання модернізованої ГВП за розрахунковий період (22 роки) складає: на один вантажний вагон робочого парку – 727725 грн; робочий парк вантажних вагонів – 62719 млн грн. Також екологічний ефект від використання модернізованої ГВП за розрахунковий період (22 роки) складає: на один вантажний вагон робочого парку – 41485 грн; робочий парк вантажних вагонів – 2327 млн грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Равлюк В. Г. Аналіз негативних наслідків від ненормативної взаємодії гальмівних колодок з колісними парами у вантажних вагонах. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. 2016. Вип. 49 (1221). С. 119 – 123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpimtck_2016_49_23 ISSN 2411-2798

2. Равлюк В. Г. Дослідження кінематики відведення гальмівних колодок від коліс у візках вантажних вагонів. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2017. Вип. 4 (234). С. 195 – 198. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSunu_2017_4_40 ISSN 1998-7927

3. Равлюк В. Г. Щодо визначення силових перетворень при клиноподібному зносі гальмових колодок вантажних вагонів. *Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: *Динаміка і міцність машин*. 2017. № 40 (1262). С. 75 – 80. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpidmm_2017_40_16 ISSN 2078-9130

4. Равлюк В. Г. Оцінювання факторів утворення дуального фрикційного зносу гальмових колодок. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології»*. 2018. № 31 (2017). С. 109 – 126. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_tsit_2017_31_13 ISSN 2617-9040

5. Равлюк В. Г. Спрощений кінетостатичний аналіз гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології»*. 2018. № 32. С. 55 – 70. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_tsit_2018_32%281%29__7 ISSN 2617-9040

6. Равлюк В. Г. Дефініція особливостей дуального зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. Вип. 183. С. 46 – 59. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2019_183_7 ISSN 1994-7852

7. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2019. №. 2 (80). С. 111 – 126. <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114> ISSN 2307-3489

8. Равлюк В. Г. Модернізація елементів гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2019. Вип. 5 (83). С. 108 – 121. <https://doi.org/10.15802/stp2019/182013> ISSN 2307-3489

9. 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. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.187.2019.196351> ISSN 1994-7852
10. Равлюк В. Г., Афанасенко І. М., Равлюк М. Г. Дослідження геометричних параметрів гальмових колодок вантажних вагонів за шкідливого зносу. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2020. Вип. 1 (85). С. 99 – 118. <https://doi.org/10.15802/stp2020/199515> ISSN 2307-3489
11. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Кириченко І. К. Статистичне опрацювання параметрів зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2020. Вип. 2 (86). С. 74 – 91. <https://doi.org/10.15802/stp2020/203103> ISSN 2307-3489
12. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Кириченко І. К., Ламнауер Н. Ю., Мельничук А. К. Імовірно-статистична модель зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2020. Вип. 5 (89). С. 116 – 133. <https://doi.org/10.15802/stp2020/217633> ISSN 2307-3489
13. 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. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-3> ISSN 2617-9040
14. Равлюк В. Г., Ламнауер Н. Ю., Елязов І. Ш. огли, Кириченко І. К., Скубак Н. М. Оцінка ресурсу гальмових колодок вантажних вагонів в умовах експлуатації. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2021. Вип. 5 (89). С. 84 – 95. <https://doi.org/10.15802/stp2021/252036> ISSN 2307-3489
15. 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. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-9> ISSN 2617-9040
16. 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. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/reruck_2022_25_5 doi:10.47675/2304-6309-2022-25-30-50 ISSN 2304-6309
17. Ravlyuk V. H., Mykhalkiv S. V., Rybin A. V., Derevianchuk Ia. V., Plakhtiy O. A. Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. Vol. 6. P. 48 – 54. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048> ISSN 2071-2227 (видання індексується в базі Scopus, Q3).
18. Panchenko S., Lovska A., Ravlyuk V., Babenko A., Derevyanchuk O., Zharova O., Derevianchuk Y. Detecting the influence of uneven loading of the brake shoe in a freight car bogie on its strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 5/7 (125) P. 6 – 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287791> ISSN 1729-3774 (видання індексується в базі Scopus, Q3).
19. Пристрій для нормативного зносу колодок механічної частини гальма візків вантажних вагонів: пат. 121003 Україна, МПК В61Н 15/00, В61Н 13/22 (2006.01), В61Н 13/34 (2006.01). а2019 00107; заявл. 03.01.19; опубл. 10.03.20, Бюл. №5. 5 с.
20. Спосіб і пристрій для підвищення довговічності та надійності механічної частини гальмівної системи вантажних вагонів: пат. 118624 Україна, МПК В61Н 15/00, В61Н 13/36 (2006.01), В61Н 13/22 (2006.01). а2017 07650; заявл. 19.07.17; опубл. 11.02.19, Бюл. №3. 8 с.

Публікації у виданнях інших держав:

21. Panchenko S., Vatulia G., Lovska A., Ravlyuk V., Elyazov I., Huseynov I. Influence of structural solutions of an improved brake cylinder of a freight car of railway transport on its load in operation. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2022. Vol. 6. P. 45 – 55. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002638> ISSN 2461-4254 (видання індексується в базі Scopus, Q2).

22. Panchenko S., Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Ravlyuk V., Harusinec J. Studying the load of composite brake pads under high-temperature impact from the rolling surface of wheels. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2023. Vol. 4. P. 155 – 167. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002994> ISSN 2461-4254 (видання індексується в базі Scopus, Q3).

23. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V., Dižo J. Stanovenie úspory energetických nákladov na pohon vlaku znížením jazdného odporu. *Technológ. Žilín: Žilinská univerzita v Žiline*. 2023. Ročník 15. Číslo 2/2023. P. 104 – 109. <https://doi.org/10.26552/tech.C.2023.2.19> ISSN 1337-8996

24. Panchenko S., Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Ravlyuk V., Rybin A. Method for determining the factor of dual wedge-shaped wear of composite brake pads for freight wagons. *Communications. Scientific Letters of the University of Zilina*. 2024. Vol. 26 (1). P. B31 – B40. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.006> ISSN 1335-4205 (видання індексується в базі Scopus, Q3).

25. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V., Dižo J., Harušinec J. Study on the Strength of the Brake Pad of a Freight Wagon under Uneven Loading in Operation. *Sensors*. 2024. 24(2). 463. <https://doi.org/10.3390/s24020463> ISSN 1424-8220 (видання індексується в базі Scopus, Q1, WoS, Q2).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

26. Равлюк В. Г. Комп'ютерне моделювання гальмівних механізмів вантажних вагонів. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали міжнародної науково-практичної конференції*. (Івано-Франківськ, 5 – 7 квітня 2017 р.). Івано-Франківськ: Симфонія Форте, 2017. С. 123.

27. Равлюк В. Г. Проблеми з ефективним використанням гальмівних колодок вагонів. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: тези доповідей 79 міжнародної науково-технічної конференції*. (Харків, 25 – 27 квітня, 2017 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2017. С. 68 – 70.

28. Равлюк В. Г. Про критичний стан із зносом і роботою гальмівних колодок у вантажних вагонах. *Проблеми розвитку транспорту і логістики: тези доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції*. (Одеса, 26 – 28 квітня, 2017 р.). Одеса: СНУ ім. В. Даля, 2017. С. 106 – 108.

29. Равлюк В. Г. Теоретичні передумови модернізації гальмової важільної передачі у візках вантажних вагонів. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: тези доповідей III Всеукраїнської науково-практичної конференції*. (Маріуполь, 11 – 12 травня, 2017 р.). Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 127 – 128.

30. Равлюк В. Г. Інноваційна модернізація гальмівної системи візків вантажних вагонів. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: матеріали 77 міжнародної науково-практичної конференції*. (Дніпро, 11 – 12 травня, 2017 р.). Дніпро: ДНУЗТ, 2017. С. 47 – 49.

31. Равлюк В. Г., Ловська А. О. Підвищення ефективності застосування гальмівних колодок рухомого складу нового покоління. *European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences: proceedings of the 15-th International scientific conference*. (Vienna, July 20, 2017). Vienna: «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2017. С. 57 – 61.

32. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г. Динамічна модель оцінювання робочих напружень у гальмових колодках вантажних вагонів. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 78 міжнародної науково-практичної конференції. (Дніпро, 17 – 18 травня, 2018 р.). Дніпро: ДНУЗТ, 2018. С. 48 – 50.

33. Равлюк В. Г., Ловська А. О. Стендова діагностика й дослідження особливостей зносу гальмівних колодок вантажних вагонів. *Materials of XIV international research and practice conference: Modern scientific potential – 2018. Construction and architecture Mathematics Modern information technology Technical science Physics.* (Sheffield, February 28 – March 7, 2018). Sheffield: Science and education LTD, 2018. Vol. 11. P. 12 – 16.

34. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г. Екологічні збитки докільню від застосування композиційних гальмівних колодок у вагонах. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика*: тези доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції. (Маріуполь, 15 – 17 травня, 2018 р.). Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2018. С. 112 – 113.

35. Равлюк В. Г. Дослідження причин виникнення дуального фрикційного зносу гальмівних колодок вантажних вагонів. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції (Івано-Франківськ, 3 – 5 квітня 2018 р.). Івано-Франківськ: Симфонія Форте, 2018. С. 170 – 171.

36. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г. Особливості модернізації гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів для ліквідації ненормативного зносу гальмових колодок. *Логістичне управління та безпека на транспорті*: збірник наукових праць науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. (Київ, 16 – 17 листопада, 2018 р.). Київ: СНУ ім. В. Даля, 2018. С. 175 – 179.

37. Ravlyuk V. Research into excessive brake pad wear in freight wagons. *Globalization of scientific and educational space innovations of transport problems, experience, prospects*: theses of international scientific and practical conference. (Italy, May 2018) Italy: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018. С. 95 – 97.

38. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей моністичного і дуального зносу гальмівних колодок вантажних вагонів. *Транспорт і логістика: проблеми та рішення*: збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї міжнародної науково-практичної конференції. (Одеса, 23 – 25 травня, 2018 р.). Одеса: Купрієнко СВ, 2018. С. 115 – 117.

39. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Гребенюк В. А., Бондаренко В. В. Дослідження розрахункової схеми гальмової важільної передачі та побудова моделі навантаження колодок вантажних вагонів. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті*: тези доповідей 8 міжнародної науково-технічної конференції. (Харків, 20 – 22 листопада 2019 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 74 – 75.

40. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Гребенюк В. А. Формулювання причин утворення верхнього шкідливого ненормативного зносу колодок у механічній частині гальм візків вантажних вагонів. *Логістичне управління та безпека на транспорті*: збірник наукових праць науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. (Лиман, 14 – 16 листопада, 2019 р.). Лиман: СНУ ім. В. Даля, 2019. С. 112 – 115.

41. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Process features and parametric assessment of the emergence of the excessive wear for the brake pads of freight car bogies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. 012025. P. 1 – 8. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012025> (видання індексується в базі Scopus).

42. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. 012026. P. 1 – 8. URL:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012026> (видання індексується в базі *Scopus*).

43. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей виникнення дуального зносу колодок у гальмовій системі візків вантажних вагонів. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали III міжнародної науково-практичної конференції*. (Івано-Франківськ, 3 – 5 квітня 2019 р.). Івано-Франківськ: Симфонія Форте, 2019. Т. 1. С. 213 – 217.

44. Ravlyuk V., Elyazov I., Afanasenko I., Ravliuk M. Determination of parameters of abnormal wear of brake pads of freight cars. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 166. 07003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607003> (видання індексується в базі *Scopus*).

45. Elyazov I., Ravlyuk V., Rybin A., Hrebenuk V. Determination of forces in the elements of the brake rigging of bogies of freight cars. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 166. 07004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607004> (видання індексується в базі *Scopus*).

46. Равлюк В. Апробація модернізованої гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції*. (Івано-Франківськ, 5 – 7 квітня 2021 р.). Івано-Франківськ: Кушнір Г. М., 2021. С. 381 – 384.

47. Равлюк В. Г. Виробничі дослідження гальмових систем і коліс вантажних вагонів. *Інтелектуальні транспортні технології: тези доповідей 2 міжнародної науково-технічної конференції*. (Харків, 27 – 29 квітня 2021 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 164 – 167.

48. Равлюк В. Г., Захарченко В. В. Теоретичні засади проектування та вдосконалення гальмових систем вантажних вагонів. *Прогресивні технології засобів транспорту: тези доповідей 1 міжнародної науково-технічної конференції*. (Харків-Миргород, 23 – 24 вересня 2021 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 123 – 125.

49. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Удосконалення конструкції гальмового циліндра вантажного вагона для попередження кутових переміщень штока. *Наука, технології, інновації: світові тенденції та регіональний аспект: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції*. (Одеса, 23 – 24 вересня 2022 р.). Одеса: ГО «Інститут інноваційної освіти», 2022. С. 112 – 113.

50. Ловська А., Равлюк В., Рибін А. Аналіз причин виникнення пошкоджень коліс вантажних візків, обладнаних композиційними гальмовими колодками. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали III Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції*. (Рівне, 19 – 20 жовтня 2022 р.). Рівне: НУВГП, 2022. С. 208 – 209.

51. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Особливості модернізації елементів гальмових важільних передач візків вантажних вагонів. *XI наукова конференція «Наукові підсумки 2022 року»*: Збірка наукових праць. (Харків, 20 грудня 2022 р.). Харків: Технологічний центр, 2022. С. 45.

52. Ловська А. О., Равлюк В. Г., Elyazov I. S. Визначення міцності удосконаленої конструкції гальмової важільної передачі візка вантажного вагона. *Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку: матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції*. (Київ, 17 – 18 листопада 2022 р.). Київ: КІЗТ ДУІТ, 2022. С. 179 – 181.

53. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Дослідження технічного стану елементів гальмових важільних передач візків вантажних вагонів. *Інтелектуальні транспортні технології: тези доповідей 3 міжнародної науково-технічної конференції*. (Харків, 22 – 23 листопада 2022 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2022. С. 185 – 188.

54. Lovska A., Ravlyuk V., Elyazov I. Determination of the load of a composite brake pad of a wagon with wedge-dual wear. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions: Proceedings of the 6 th Annual Conferences*. (Tallin, November 28, 2022). Tallin: Scientific Route, 2022. P. 32 – 34.

55. Lovska A., Ravlyuk V., Babenko A. Study of the stress-strain state of the brake lever

transmission of the 18-100 carriage model. *ScienceRise*. 2022. Vol. 6. P. 3–9. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002796> ISSN 2313-6286

56. Панченко С. В., Ватуля Г. Л., Ловська А. О., Равлюк В. Г. Дослідження термонапруженого стану клинодуально зношеної колодки вагона при експлуатаційних навантаженнях. *Сучасна наука: інновації та перспективи*: матеріали міжнародної мультидисциплінарної науково-практичної інтернет-конференції молодих дослідників, здобувачів вищої освіти та науковців. (Київ, 6–7 квітня 2023 р.). Київ: КІЗТ ДУІТ, 2023. С. 330 – 333.

57. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Дослідження технічного стану гальмових систем візків вантажних вагонів в умовах експлуатації. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*: матеріали 82 міжнародної науково-практичної конференції. (Дніпро, 20-21 квітня 2023 р.). Дніпро: УДУНТ, 2023. С. 318 – 320.

58. Панченко С. В., Герліці Ю., Ватуля Г. Л., Ловська А. О., Равлюк В. Г., Гарушінець Й. Дослідження термонапруженого стану композиційних гальмових колодок візків вантажних вагонів. *Транспорт: наука та практика*: матеріали II-ї міжнародної науково-практичної конференції. (Київ – Одеса, 25 – 26 травня 2023 р.). Київ: СНУ ім. В. Даля, 2023. С. 164 – 166.

59. Ловська А. О., Равлюк В. Г. Дослідження термонапруженого стану композиційної гальмової колодки з клинодуальним зносом під час гальмування. *XXVI міжнародній науково-технічній конференції „Технологія-2023”*. (Київ, 26 травня 2023 р.). Київ: СНУ ім. В. Даля, 2023. С. 97 – 99.

60. Panchenko S. V., Vatulia G. L., Lovska A. O., Ravlyuk V. G. Determination of the thermal stress state for the composite brake pad of a wagon at operational loads. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (ICSF-2023)*. 2023. Vol. 1254. 012141. P. 1 – 12. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1254/1/012141> (видання індексується в базі Scopus).

61. Panchenko S., Vatulia G., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V. Study of the Strength of the Upgraded Brake Leverage of a Wagon Bogie. In: Arsenyeva O., Romanova T., Sukhonos M., Biletskyi I., Tsegelnyk Y. (eds) *Smart Technologies in Urban Engineering (STUE 2023). Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol 807. P. 243 – 254. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_22 (видання індексується в базі Scopus).

62. Панченко С. В., Ловська А. О., Равлюк В. Г. Інноваційна механічна гальмова система візка – шлях до забезпечення руху поїздів. «*Рухомий склад нового покоління: із ХХ в ХХІ сторіччя*»: тези доповідей III міжнародної науково-практичної конференції. (Харків, 22 – 23 листопада 2023 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 39 – 41.

63. Розробка конструкторсько-технологічної документації на проведення модернізації гальмових важільних передач візків вантажних вагонів: звіт про НДКР (заключий): Українська державна академія залізничного транспорту. № ДР 0111U008972. Харків: 2012. 53 с.

64. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V. Substantiation of the environmental efficiency of the device for parallel retraction of brake shoes for freight wagons. *Current problems in rail vehicles - PRORAIL 2023*. 2023. P. 109 – 118. <https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.2.13>

65. Підсилюючий пристрій до паралельного відведення колодок від коліс у гальмівній системі візків вантажних вагонів: пат. 121889 Україна, МПК51 В60Т 1/02 (2006.01), В61Н 15/00, В61Н 13/00. u2017 04009; заявл. 24.04.17; опубл. 26.12.17, Бюл. №24. 5 с.

66. Пристрій для запобігання ненормативного зносу колодок механічної частини гальма візків вантажних вагонів: пат. 153753 Україна, МПК (2023.01). В60Т 1/02 (2006.01), В61Н 15/00, В61Н 13/00; заявл. 19.12.22; опубл. 23.08.23, Бюл. №34. 4 с.

67. Гальмова важільна передача візка вантажного вагона з пристроєм рівномірного відведення гальмових колодок від коліс: пат. 154619 Україна, МПК51 (2023.01). В61Н 15/00, В61Н 13/26 (2006.01), В60Т 1/02 (2006.01). u2022 04848; заявл. 19.12.22; опубл. 29.11.23, Бюл. №48. 4 с.

АНОТАЦІЯ

Равлюк В. Г. Розвиток наукових основ з забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів (273 – залізничний транспорт). – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми для залізничного транспорту – розвитку наукових основ з забезпечення руху поїздів шляхом підвищення ефективності експлуатації гальмових систем вантажних вагонів. У дисертаційній роботі запропоновано методи для визначення зносів складових гальмових систем візків, зокрема клинодуального зносу колодок через порушення умов експлуатації й недосконалості конструкції механічної частини гальм візків.

Запропоновано системний підхід класифікації факторів, що впливають на працездатність і ефективність роботи гальмових систем візків. Запропоновано графоаналітичний метод для визначення коефіцієнта клинодуальності колодок залежно від пробігу вантажного вагона, метод для визначення геометричних параметрів корисної площі контакту гальмової колодки з поверхнею кочення колеса залежно від величини зазора між колесом і колодкою, метод для визначення міцності колодки при її нерівномірному навантаженні. Визначено термонапружений стан колодки з номінальними параметрами і колодки з урахуванням нерівномірного навантаження, під час експлуатаційних навантажень. Запропоновано моделі для прогнозування залишкового ресурсу колодок залежно від пробігу вагона з модернізованою гальмовою важільною передачею. Виконано техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів. Отримані результати розрахунків підтвердили доцільність прийнятих рішень.

Ключові слова: безпека руху, гальмова система, залізничний транспорт, рухомий склад залізниць, транспортна механіка.

ABSTRACT

Ravlyuk V. G. Development of scientific basis for train safety by improving the efficiency of wagon braking systems. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Engineering Sciences in Specialty 05.22.07 – Rolling Stock of Railways and Train Traction (273 – Railway Transport). – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific problem for railway transport, that is the development of scientific basis for train traffic safety by increasing the efficiency of wagon braking systems. The dissertation proposes methods for determining the wear of brake system components of bogies, in particular, dual wedge-shaped wear of pads due to violation of operating conditions and imperfection of the

mechanical part design of bogie brakes. On the basis of a systematic approach, a classification of factors influencing the safe operation and efficiency of brake systems of wagon bogies is proposed.

For the first time, a graphic analytical method is proposed for determining the coefficient of dual wedge-shaped wear of composite brake pads depending on the wagon mileage. This will allow for a proper assessment of the braking efficiency of wagons.

A method is proposed for determining the geometric parameters of the useful contact area of a worn pad according to the harmful abrasion and gap between the wheel and the pad. It can be used to assess the braking performance of a freight train equipped with composite brake pads.

A comprehensive thermal calculation was performed for a pad with nominal parameters and a pad with dual wedge-shaped wear under operating loads. The mathematical apparatus for determining the strength of the pad under its uneven loading is proposed. In this case, the pad is considered as a rod system loaded with concentrated forces and bending moment. The results of the calculations show that the stresses in the pad exceed the permissible values by 29%, so its strength is not ensured.

The thermal stress state of pads with nominal parameters and uneven loading was determined. It is established that for a pad with nominal parameters, the maximum stresses are 14.9 MPa and do not exceed the permissible values. For the pad that perceives uneven load and has abnormal wear, the maximum stresses are 19 MPa, that is, they exceed the permissible values by 21 %.

The measures to modernize the brake lever transmission of the wagon bogie are substantiated. It is important to note that these measures do not require significant capital investments and ensure uniform wear of the pads while a wagon is in motion. The dissertation presents the results of operational tests of prototype wagons with a mileage of 121,300 km and the brake lever transmission upgraded using the technology developed at Ukrainian State University of Railway Transport. It was found that the experimental brake lever gears had no damage. Thus, a uniform wear of pads in operation, which can improve the train safety, it ensured.

The models for forecasting the residual life of pads are proposed, provided that the modernized bogie brake lever transmission is used for the entire overhaul period as guaranteed by the car repair enterprise.

The dissertation proposes a methodology for determining the economic and environmental effect of the modernised bogie brake lever transmission over the calculation period, if the transmission is adapted to the operating conditions of wagons of JSC Ukrzaliznytsia according to different series of locomotive traction.

All the theoretical and practical results of the dissertation can be used for developing innovative brake systems of wagon bogies; their use may significantly increase the railway transport efficiency.

Keywords: traffic safety, brake system, railway transport, rolling stock, transport mechanics.

РАВЛЮК ВАСИЛЬ ГРИГОРОВИЧ

УДК 629.4.017:629.4.018

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ З УБЕЗПЕЧЕННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ
ШЛЯХОМ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЛЬМОВИХ
СИСТЕМ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



доц. Рибін А. В.

Підписано до друку 17 квітня 2024 р.
Формат 60x84 1/16 Папір для множних апаратів
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 2,0
Тираж 150 прим.

Надруковано у копіцентрі «Panda-Print»
(ФО-П Панарін В. С.)
61050, м. Харків, м-н. Фейєрбаха, 17