СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Старченко Валерій Миколайович

УДК 629.4.027:625.1.03:621.891

**Наукові основи підвищення ефективності**

**гальмування поліпшенням умов взаємодії коліс**

**з гальмівними колодками і рейками**

05.22.07 - Рухомий склад залізниць і тяга поїздів

*Автореферат*

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Луганськ - 2008

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки й техніки України **Голубенко Олександр Леонідович**, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, ректор

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Коротенко Михайло Леонідович**, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка Всеволода Лазаряна, професор кафедри «Теоретична механіка»;

доктор технічних наук, професор **Маслієв В'ячеслав Георгійович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Електричний транспорт і тепловозобудування»;

доктор технічних наук, професор **Головінов Геннадій Георгійович**, Академія митної служби України, начальник кафедри «Транспортні системи і технології в митній справі»

Захист відбудеться 26 травня 2008 р. о 10 00 на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 29.051.03 Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля за адресою: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а, СНУ ім. В. Даля, корп. 1.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці університету за адресою: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а, СНУ ім. В. Даля.

Автореферат розіслано 25 квітня 2008 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Ю.І. Осенін

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Вступ.** Залізниці України є базовою галуззю економіки країни й основою її транспортної системи. Експлуатаційна довжина мережі залізниць становить понад 22 *тис. км* і за вантажонапруженістю перевищує показники розвинених європейських країн.

Загальною тенденцією розвитку залізничного транспорту є підвищення осьової потужності тягового рухомого складу і збільшення швидкості руху. У минулому році електропоїзд серії TGV (Франція) показав рекордну швидкість – 574,8 *км/год*, а технічно реальною та економічно виправданою нині прийнято максимальну швидкість руху в 350 *км/год.* Рух потягів в Україні здійснюється з максимальною швидкістю 160 *км/год* і до 2012 року заплановане її підвищення до 200 *км/год.* В основному обмеження швидкісного режиму обумовлено вимогами безпеки руху, проблемами гальмування та взаємодією швидкісного рухомого складу і колії.

У процесі експлуатації поверхні катання й гребені ходових коліс взаємодіють із рейками, а у випадку колодкового гальмування - і з колодками на гальмівних осях. Внаслідок цього обидві пари тертя взаємно впливають на процес зношування коліс і рейок, на формування контактної зони між ними й рівень контактних напружень, що виникають, і, отже, на сили зчеплення, що визначають величину тягових і гальмівних зусиль рухомого складу.

Для підвищення ефективності гальмування рейкового рухомого складу необхідно створити гальмівними пристроями достатню гальмівну потужність і забезпечити стійке зчеплення коліс із рейками.

**Актуальність теми.** У швидкісних потягах для виконання нормативних вимог з довжини гальмівного шляху, часу гальмування й припустимому уповільненню додатково застосовуються магнітнорейкові та вихрострумові гальмівні системи, що не використовують зчеплення коліс із рейками, оскільки електродинамічні й механічні (фрикційні) пристрої мають обмеження по зчепленню й недостатню гальмівну потужність.

У той же час за умовами безпеки при службовому, повному і екстреному гальмуванні механічні гальма є незамінною гальмівною системою. Гранична гальмівна потужність колодкових і дискових гальм не перевищує відповідно 650 кВт і 800 кВт на одну колісну пару, що обумовлено зростанням руйнуючого термічного впливу на контактні поверхні коліс або дисків, а також на матеріал гальмівних колодок або накладок.

Підвищення ефективності механічних гальмівних систем рухомого складу (колодкових і дискових) можливе застосуванням нових фрикційних матеріалів і збільшенням зчеплення завдяки поліпшенню умов взаємодії коліс із рейками.

За останні 15 років ресурс вагонних коліс із 12 скоротився до 4...5 років, змінюваність рейок по бічному зношуванню головки виросла в 2...3 рази, а інтенсивність зношування гребенів досягла 0,5.. .2,5 мм на 10 тис. км пробігу. Істотний прямий і опосередкований вплив на зменшення ресурсу коліс і рейок справляють гальмівні колодки, а часта взаємна змінюваність – робота нових колодок зі зношеним профілем коліс і численні переточування бандажів через підріз гребенів - погіршують ситуацію. Витрати по утриманню рухомого складу й колії постійно збільшуються, а науково-технічна проблема додатково набуває економічного характеру.

Для прийняття обґрунтованих технічних рішень, що дозволили б поліпшити існуючий стан речей, необхідні поглиблені наукові дослідження з розробкою теоретичних положень і математичних моделей контактної, фрикційної й динамічної взаємодії для системи “гальмівна колодка - колесо - рейка“.

У зв'язку з цим підвищення ефективності гальмування рейкового рухомого складу застосуванням принципово нових фрикційних матеріалів для гальмівних колодок і поліпшенням умов взаємодії коліс із рейками є актуальною науковою проблемою, що має велике значення для розвитку й удосконалення залізничного транспорту.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дослідження, виконані в дисертаційній роботі, проводилися згідно з "Державною науково-технічною програмою розвитку залізничного транспорту України", "Програмою розвитку залізничного транспорту на 2005...2010 роки ", планом нової техніки Транспортної академії України і Укрзалізниці, планом нової техніки ВАТ “ХК “Луганськтепловоз” - тема ДО2004-01 "Науково-технічне обґрунтування вдосконалення ходових частин рухомого складу залізниць у 2004…2005 рр.", держбюджетних і господарських НДР згідно з темами: "Наукові основи, концепція й теорія створення перспективних конструкцій транспорту з поліпшеними енергетичними та екологічними характеристиками", "Наукове обґрунтування, виготовлення та випробування дослідних вузлів і деталей, виготовлених з композиційних матеріалів на основі вуглецю, для опорних і гальмівних пристроїв тепловоза ТЕП 150 і рухомого складу" (тема Т-133-05, № держ. per. 0105U006925).

**Мета і завдання дослідження**. Підвищення ефективності гальмування рейкового рухомого складу поліпшенням умов взаємодії коліс із гальмівними колодками і рейками при зменшенні інтенсивності зношування контактних поверхонь і збільшенні терміну служби.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- удосконалити математичну модель динамічної контактної взаємодії колеса з рейкою, установити залежності для оцінки і уточнення рівня та характеру розподілу контактних напружень;

- удосконалити математичну модель взаємодії рухомого складу і колії, установити домінантні фактори і їхній вплив на рівень динамічних сил для визначення напрямку і раціональних параметрів конструктивного вдосконалення візкових рейкових екіпажів,

- розробити теоретичні основи, методику розрахунку, компонентний склад, структуру та конструктивне виконання гальмівних С-С колодок на основі вуглець - вуглецевих волокон з піровуглецевою матрицею для підвищення ефективності механічних гальмівних систем і зменшення термічного впливу на поверхню катання коліс;

- виконати комплексні експериментальні дослідження нових гальмівних С-С колодок і встановити закономірності впливу на їхні фрикційні характеристики якісного, кількісного і фракційного вмісту різних компонентів та модифікаторів тертя;

- встановити експлуатаційні характеристики і закономірності впливу на величину та стабільність коефіцієнта тертя питомого навантаження, швидкості ковзання та температури на контактній поверхні тертя;

* розробити математичну модель нестаціонарного теплового процесу колодкового гальмування, встановити закономірності впливу різних компонентів на теплопровідність і ефективність гальмівних С-С колодок щодо зниження температурної напруженості;
* розробити компонентний склад, структуру, технологічні схеми виготовлення і провести комплексні випробування натурних зразків антифрикційних самозмащувальних композиційних матеріалів на основі капролону з низьким і стабільним коефіцієнтом тертя для опорних пристроїв кузова на візки рухомого складу;

- створити експериментальні установки з вимірювальними комплексами та програмним забезпеченням для перевірки результатів теоретичних досліджень і відповідності математичних моделей реальним процесам взаємодії коліс з гальмівними колодками й рейками.

**Об'єкт дослідження:** процеси контактної, динамічної і фрикційної взаємодії коліс з гальмівними колодками та рейками.

**Предмет дослідження:** закономірності взаємодії коліс з гальмівними колодками і рейками під впливом конструктивних, технологічних, матеріалознавських та експлуатаційних факторів.

**Методи дослідження.** У теоретичній частині роботи використано основні положення класичної теорії пружності, механіки контактної взаємодії і механіки твердого тіла, спроможного до деформування, математичні методи розв'язку інтегральних рівнянь динамічних змішаних задач теорії пружності, математичне моделювання процесу руху потягу і чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь.

В експериментальній частині для обробки результатів випробувань використано методи теорії ймовірностей, математичної статистики та математичного планування експериментів.

Достовірність наукових результатів підтверджується результатами експериментальних досліджень, що засвідчує відповідність прийнятих допущень характеру вирішуваних завдань, правильний вибір способів і технічних засобів випробувань, вимірювальної та реєструючої апаратури і методів обробки результатів експериментів.

**Наукова новизна отриманих результатів**:

- одержала подальший розвиток математична модель динамічної контактної взаємодії колеса і рейки з урахуванням осциляції ядер інтегральних рівнянь, принципу граничного поглинання, що характеризує внутрішнє тертя, і збурювань у виді гармонійних функцій;

- уперше запропоновано теоретичне обґрунтування, компонентний склад, структура і конструктивне виконання гальмівних С-С колодок на основі вуглецевих волокон з піровуглецевою матрицею та модифікаторами тертя для гальмівних систем рухомого складу;

- уперше встановлено закономірності впливу на фрикційні характеристики гальмівних С-С колодок якісного, кількісного, фракційного складу компонентів і модифікаторів тертя, а також питомого навантаження, швидкості ковзання та температури контактної поверхні;

- удосконалено математичну модель нестаціонарного теплового процесу гальмування системи "гальмівні колодки - колесо - рейка" з умовою пропорційності теплового потоку, що виділяється в плямі контакту, потужності сил деформації від контактних динамічних напружень;

- експериментально встановлено закономірності впливу компонентів гальмівних С-С колодок на величину коефіцієнта теплопровідності, що визначає температурну напруженість контактної зони тертя;

- уперше експериментально встановлено експлуатаційні характеристики антифрикційних самозмащувальних композиційних матеріалів на основі капролону для опорно-повертальних пристроїв рухомого складу, раціональних за критерієм мінімізації коефіцієнта тертя.

**Практичне значення отриманих результатів**. Розвиток теорії динамічної контактної взаємодії колеса з рейкою сприяє визначенню дійсної величини і характеру розподілу контактних напружень для визначення тягових та гальмівних зусиль при багатомірному математичному моделюванні і дослідженні динамічних та теплових процесів при взаємодії екіпажа й колії. Встановлені закономірності дозволяють приймати раціональні конструктивні рішення при проектуванні, створенні і модернізації візкових рейкових екіпажів.

Пропоновані гальмівні С-С колодки відрізняються високими експлуатаційними і теплофізичними характеристиками, сприяють зменшенню термічного впливу на поверхню кочення коліс та рейок і підвищенню ефективності роботи гальмівних пристроїв. Використання С-С колодок дозволяє знизити зусилля натиснення у два рази при збереженні довжини гальмівного шляху й зменшити його величину при великих початкових швидкостях гальмування.

Використання в опорних пристроях антифрикційного матеріалу на основі капролону з наповнювачами у виді мінерального масла, дисульфід молібдену та лускатого графіту з низьким і стабільним коефіцієнтом тертя забезпечує зниження до 32% опору повороту візків щодо кузова в плані і завдяки цьому поліпшує умови взаємодії колеса з рейкою.

Практична цінність роботи підтверджена новими технічними рішеннями (двосекційна гальмівна колодка, фрикційний композитний матеріал, фрикційний диск, гальмо й ін.), які виконані на рівні винаходів і захищені авторськими свідоцтвами та патентами.

Розроблені математичні моделі, методики, алгоритми, програмні й технічні засоби знайшли практичне застосування в ВАТ «ХК «Луганськтепловоз» і ВАТ «ЛуганськПТІмаш» при створенні нового пасажирського тепловоза ТЕП 150, у процесі проектування й розробки перспективних вантажних і пасажирських тепловозів, дизель- і електропоїздів ДПЛ-2, ДЕЛ-02, ЕПЛ9Т, а також трамвайних вагонів.

Технічна документація на пропоновані композиційні матеріали використовується при виготовленні гальмівних колодок (накладок) для гальмівних пристроїв, у тому числі дискових гальм, і полімерних антифрикційних накладок - для підшипників ковзання й опорних пристроїв кузова на візки.

Основні результати досліджень, лабораторні стенди і установки використовуються в навчальному процесі, у науково-дослідній роботі, у курсовому та дипломному проектуванні при підготовці бакалаврів, фахівців і магістрів за фахом: «Рухомий склад і спеціальна техніка залізничного транспорту», а також у курсах дисциплін «Безпека руху залізничного транспорту», «Основи експлуатації транспортних засобів», «Локомотивне й вагонне господарство» тощо Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

**Особистий внесок здобувача**. Наукові положення, розробки і результати досліджень, котрі виносяться на захист, отримані автором самостійно і в основному опубліковані без співавторів. У спільних роботах здобувач:

* запропонував підходи, виконав аналітичні перетворення й одержав асимптотичні розв'язки інтегральних рівнянь динамічних контактних задач щодо взаємодії колеса з рейкою, руху колеса по пружному шару і руху клина в пружному шарі [16, 17, 18, 35];
* обґрунтував, виконав перетворення та одержав аналітичні залежності для вирішення динамічної контактної задачі з обмеженням при взаємодії колеса з рейкою [25];
* запропонував конструктивні вдосконалення візків для підвищення тягових і гальмівних властивостей електропоїздів [33];
* обґрунтував і розробив методику проведення експериментальних досліджень гальмівних колодок із С-С композитів [8, 9, 13, 14, 24, 26];
* запропонував і розробив основні положення використання комп'ютерної вимірювальної системи для випробування гальмівних пристроїв [5, 37];
* запропонував компонентний склад, структуру, розробив способи виготовлення модифікованих фрикційних С-С композитів [21, 26];
* обґрунтував методику проведення експериментальних досліджень теплового стану фрикційних накладок гальмівних пристроїв, узагальнив результати досліджень [12, 24, 39];
* запропонував компонентний склад, структуру, розробив технологічні схеми та способи виготовлення, керував проведенням випробувань антифрикційних матеріалів на основі капролону з наповнювачами у виді мінерального масла, дисульфіду молібдену й лускатого графіту [23].

**Апробація результатів дисертації.** Дисертаційна робота у повному обсязі повідомлена таобговорена на розширеному засіданні вченої ради Інституту рейкового транспорту, на постійно діючому спеціалізованому семінарі з наукового напрямку "Рухомий склад залізниць і тяга поїздів", на засіданні кафедри "Залізничний транспорт" Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (СНУ ім. В. Даля) і одержала позитивну оцінку.

Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися на: щорічних науково-технічних конференціях СНУ ім. В. Даля (Луганськ, 1989...2007 рр.); Всесоюзній науково-технічній конференції "Забезпечення надійності вузлів тертя машин" (Ворошиловград, 1988 і 1989 рр.); всесоюзних і міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми розвитку локомотивобудування" (Луганськ, 1990, 1993, 1995 рр., Москва, 1996 р.); міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми розвитку рейкового транспорту" (X-XVII конференції в Криму, 2000...2007 рр.); міжнародних конференціях "Проблеми механіки залізничного транспорту" (Дніпропетровськ, 2000, 2004 і 2008 рр.); VI-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми механіки гірничо-металургійного комплексу" (Дніпропетровськ, 2004 р.); міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми і перспективи розвитку транспорту промислових регіонів" (Дніпропетровськ, 2005 і 2006 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції "Наука в транспортному вимірі" (Київ, 2005 р.); Міжнародній науково-практичній конференції "Наука в транспортному вимірі: пасажирські перевезення" (Київ, 2006 р.); міжнародних науково-практичних конференціях "Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту" (64 - 67 конференції, Дніпропетровськ, 2004...2007 рр.); міжнародних наукових конференціях «Університет і регіон», Луганськ (2001…2007 рр.); Міжнародній науковій конференції "Наука, техніка й вища освіта: проблеми і тенденції розвитку" (м. Пореч, Хорватія, 2006 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 63 наукових роботи. З них 1 - монографія, 35 статей у наукових виданнях, 17 тез доповідей на конференціях, 10 авторських свідоцтв і патентів.

Основний зміст роботи викладено в 32 друкованих працях, які опубліковані у виданнях, затверджених ВАК України.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів і додатків. Основний текст викладено на 297 сторінках, список літературних джерел містить 456 найменувань. Текст ілюструється 133 рисунками і містить 47 таблиць.

**ОСНОВНИЙ ЗМІСТ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність і новизну тематики роботи, сформульовано цілі і завдання дисертації, обрано об'єкт, предмет та методологію дослідження, сформовано основні напрямки вирішення проблеми.

**У першому розділі** наведено аналіз наукових праць з проблеми контактної, фрикційної й динамічної взаємодії коліс із рейками й гальмівними колодками, довговічності елементів системи «гальмівна колодка-колесо-рейка», ефективності фрикційних матеріалів і процесу гальмування рухомого складу.

Дотична сила зчеплення при русі в режимі тяги або гальмування реалізується на контактній площадці взаємодії колеса з рейкою й залежить від безлічі невизначених факторів, що постійно змінюються, обумовлених фізико-механічними властивостями матеріалів, трибологічним станом поверхонь тертя, конструктивним виконанням екіпажа, станом рейкової колії, зношенням контактних поверхонь коліс і рейок, умовами зовнішнього середовища та ін.

Основними з множини факторів є контактні напруження, відносне ковзання (проковзування, крип) і тертя, що виникають при взаємодії колеса з рейкою та гальмівними колодками. Основою для вирішення прикладних контактних задач взаємодії колеса з рейкою є класичні методи теорії пружності і механіки твердого тіла, спроможного до деформування. Поверхня катання колеса взаємодіє з рейкою та гальмівними колодками і є загальною поверхнею тертя, що й спричиняє взаємовплив елементів системи "гальмівна колодка - колесо - рейка" на їхню зносостійкість і термін служби (рис. 1). Особливо це проявляється в процесі гальмування, коли поверхня катання колеса має контактну взаємодію з рейкою і фрикційне - з гальмівними колодками, при цьому теплові потоки від роботи сил тертя розігрівають контактну поверхню колеса до 400...1000°С, що сприяє інтенсивному зношуванню елементів системи й утворенню після остигання термічних мікротріщин на ободі, котре є наслідком нерівномірності температурного поля на поверхні і усередині матеріалу колеса при значній термонапруженості.

При математичному моделюванні руху локомотива у виді просторової механічної коливальної системи з багатьма степенями вільності збурюючий вплив від колії прийнято задавати у виді функцій переміщення у вертикальній і горизонтальній площинах, які визначаються незалежно і можуть задаватися детермінованими або стохастичними. Найчастіше випадкові збурення задаються методом пропускання «білого шуму» крізь лінійний фільтр.

При високих швидкостях руху необхідно враховувати систематичні збурення в системі “колесо – рейка” від дії плавних ізольованих нерівностей (катана вибоїна), повзунів і безперервних плавних нерівностей на поверхні катання (некруглостей коліс), які виникають при нерівномірному прокатуванні по колу колеса і його ограновуванню при гальмуванні. Із зростанням прокатування збільшуються прослизання, сили крипу і рівень динамічних сил в зоні контактної взаємодії колеса з рейкою, особливо в кривих ділянках колії. При цьому величина контактного напруження перевищує пороговий рівень, що підвищує вірогідність виникнення втомних руйнувань, сприяє інтенсивному зношуванню і скороченню терміну служби коліс і рейок. З цієї причини швидкісні залізниці – Cartier в Канаді і Spoornet в ПАР – ввели як критерій вилучення коліс з експлуатації глибину прокату 2 мм.

Класичні роботи з теорії пружності, дослідження взаємодії рухомого складу і колії, зчеплення колеса з рейкою, контактних задач і процесів гальмування отримали значний розвиток в роботах А.І. Бєляєва, М.М. Бєляєва, І.В. Бірюкова, Є.П. Блохіна, М.Ф. Веріго, Л.О. Вуколова, Л.О. Галіна, О.Л. Голубенка, І.Г. Горячевої, В.М. Данілова, Ю.В. Дьоміна, А.С. Євстратова, О.П. Єршкова, В.М. Іванова, В.Г. Іноземцева, І.П. Ісаєва, О.Ю. Ішлінського, В.М. Казарінова, О.Я. Когана, О.М. Коняєва, К.П. Корольова, М.Л. Коротенка, С.М. Куценка, В.А. Лазаряна, Д.П. Маркова, В.Г. Маслієва, В.Б. Меделя, М.І. Мусхелішвілі, Ю.І. Осеніна, А.П. Павленка, Д.Ю. Погорєлова, Е.Д. Тартаковського, Т.А. Тібілова, С.П. Тимошенка, В.Ф. Ушкалова, І.І. Челнокова, В.М. Шестакова, І.Я. Штаєрмана та ін., а також в роботах зарубіжних дослідників Буссинеська (Boussinesq J.), Герца (Hertz H.), Грінвуда (Greenwood J.A), Гудьєра (Goodier J.N), Джонсона (Johnson K.L.), Калкера (Kalker J.J.), Картера (Carter F.W.), Каттанео (Cattaneo C.), Кноте (Knothe K.), Креттека (Krettek O.), Лява (Love A.E.H.), Ляме (Lamе G.), Міндліна (Mindlin R.D.), Черруті (Cerruti V.) та ін.

У більшості робіт, присвячених дослідженню процесу зношування коліс і рейок, розглядається тільки пара тертя колесо-рейка і не враховується вплив іншої пари тертя – гальмівна колодка-колесо. Неправомірність такого підходу виходить з експлуатаційних спостережень, які показують, що гальмівні колодки значно впливають на інтенсивність зношування коліс і рейок. Металокерамічні гальмівні колодки мають більш високий коефіцієнт тертя, а відповідно і ефективність гальмування, але зумовлюють значно більше зношування коліс і внаслідок впливу останніх (у здеформованому стані) - підвищене зношення рейок. Таким чином, при оптимізації твердості матеріалів у системі “колесо - рейка” необхідно враховувати не тільки осьове навантаження, радіуси кривих ділянок колії і конструкцію гальмівної системи, але й вплив гальмівних колодок.

Колодкові гальма при початковій швидкості гальмування понад 140 *км/год* не забезпечують необхідної ефективності через недостатню гальмівну потужність, що обмежується руйнуючим термічним впливом на поверхню катання коліс і гальмівних колодок. Тривале або екстрене гальмування композиційними колодками з низькою теплопровідністю призводить до локального перегріву контактних поверхонь, при цьому утворюються напливи металу і відбуваються необоротні структурні перетворення їхнього зв’язуючого - смоли або каучуку, а при подальших гальмуваннях внаслідок цього на поверхні катання колеса утворюються подряпини, задири і термотріщини.

Для підвищення ефективності гальмування та зменшення термічного впливу на поверхню катання колеса необхідні принципово нові фрикційні матеріали – одночасно більш термостійкі і більш теплопровідні, застосування яких дозволило б істотно підвищити реалізовану гальмівну потужність на осі при безумовному дотриманні умов безпеки руху і нормативних вимог.

Збільшення терміну служби коліс і рейок завдяки лубрикації, а також оптимізація твердості матеріалів до НВ 370...400 уже показали високу ефективність, однак не вважаються вичерпними й достатніми, тому що підвищене зношування бічної грані рейок і гребенів коліс зумовлене значним горизонтальним тиском коліс на рейки, тобто напрявляючим зусиллям і кутом набігання коліс, а також збільшеною тривалістю взаємодії гребенів коліс із рейками при русі в кривих, а також і на прямих ділянках шляху.

При підвищеному моменті тертя в опорних пристроях кузова на візки зростання інтенсивності зношування бічної грані рейок і гребенів коліс сягає рівня 45*%*, що зумовлено збільшенням направляючого зусилля в зоні контакту гребеня колеса з рейкою при вписуванні візкових екіпажів у криві ділянки і наступному русі з перекосом у прямих ділянках шляху. Аналіз указує на необхідність удосконалення конструкції візкових екіпажів і експлуатаційних характеристик вузлів тертя в зчленуванні кузова й візків не тільки з метою зменшення зношування, але й для підвищення зчеплення коліс із рейками завдяки поліпшенню умов їхньої взаємодії зменшенням перекошування.

На підставі досвіду експлуатації рухомого складу і аналізу літературних джерел з досліджуваної проблеми було визначено мету і завдання цієї роботи.

**У другому розділі розглядаються** двовимірні і просторові динамічні контактні задачі взаємодії колеса з пружною ізотропною рейкою, наведено механічну і математичну постановку задач і здійснене строге виведення інтегральних рівнянь з урахуванням принципу граничного поглинання. Досліджуються сталі режими вертикальних і кутових коливань колеса при взаємодії з пружною рейкою під дією гармонійного у часі ф навантаження .



Задачі формулюються таким чином, що одна з компонент напруження приймається такою, що дорівнює нулю на всій межі рейки. Виведення інтегрального рівняння для опису вертикальних коливань з використанням принципу граничного поглинання ґрунтується на розв'язку рівнянь Ляме. В цьому випадку збурена крайова задача набуває виду:

Використання принципу граничного поглинання і інтегрального перетворення Фур’є по змінній приводить задачі до розв'язку інтегрального рівняння щодо амплітудного значення невідомого нормального контактного напруження у виді:



Задачу руху колеса з постійною швидкістю по пружній рейці товщиною приведено до розв'язку динамічних рівнянь Ляме (1). Використовуючи інтегральне перетворення Фур'є для визначення контактних напружень , отримане інтегральне рівняння в безрозмірних змінних:



Ядро інтегрального рівняння (6) містить два безрозмірних параметри й, що входять у коефіцієнти, котрі характеризують товщину рейки і швидкість руху колеса.



Динамічна контактна задача щодо руху клина в пружному шарі, розвиток тріщини в рейці, приведена до розв'язку рівняння у виді:

Просторова динамічна контактна задача щодо вертикальних коливань колеса при довільній області контакту із пружним півпростором і дією гармонійного збурювання розглядається в припущенні, що в зоні контакту відсутні сили тертя і відрив колеса від рейки. Півпростір і колесо віднесені до прямокутної системи координат , поверхня контакту колеса з півпростором, що займає зону , знаходиться у площині . Застосувавши до рівнянь Ляме дворазове перетворення Фур'є, отримуємо двовимірне інтегральне рівняння першого роду (8) з нерегулярним різницевим ядром (9) щодо амплітудного значення нормального контактного напруження у виді:



За такою ж схемою отримано інтегральне рівняння для визначення контактних дотичних напружень. У вигляді окремого випадку отримані інтегральні рівняння вертикальних і горизонтальних коливань колеса при смуговому контакті із пружним півпростором.

Уводячи в розгляд трансформанти Фур'є функцій, і підставляючи їх в (8), одержимо інтегральне рівняння в безрозмірних змінних

Інтегральне рівняння (10) відрізняється від (3) для розв'язку плоскої задачі тільки параметром , тому використані такі ж методи розв'язку.



На прикладі задачі щодо вертикальних коливань колеса при взаємодії із пружною рейкою показано асимптотичні методи розв'язку інтегральних рівнянь, які дозволяють досліджувати основні характеристики задач із достатнім для практики ступенем точності.

При розв'язку двовимірної задачі щодо вертикальних коливань колеса під зусиллям у виді використано прийом накладення двох розв'язків: від статичної і динамічної дії, при цьому обмежений розв'язок від статичного зусилля отримано у виді. Обмежений розв'язок від динамічного зусилля отримано асимптотичним методом для випадку малих відносних частот коливань. Асимптотичні формули для визначення амплітудних значень нормальних контактних напружень набувають виду:

Використовуючи асимптотичні методи, за допомогою яких розв'язана плоска задача, розглянуто розв'язок і для просторової контактної задачі, що наведена до двовимірного інтегрального рівняння виду (8). Асимптотичні і чисельно-аналітичні методи теорії пружності і контактної механіки при дослідженні динамічних контактних задач щодо взаємодії колеса з рейкою дозволили визначити рівень контактних напружень і встановити характер їхнього розподілу по зоні контакту.

Отримані результати використані при багатомірному моделюванні руху візкового екіпажа локомотива в складі потяга для визначення сил зчеплення і теплового потоку, що виникає в контактній зоні тертя коліс із рейками в процесі їхньої взаємодії.

**У третьому розділі** одержали подальшого розвитку теоретичні дослідження динамічних характеристик екіпажів локомотивів на основі вдосконалення просторової математичної моделі руху локомотива в складі потяга. Моделювання проведено з метою визначення ступеня впливу на рівень динамічного діяння різних факторів конструктивного і експлуатаційного характеру, а також поліпшення характеристик і умов взаємодії рухомого складу й колії раціональним вибором параметрів та характеристик візкових екіпажів.

В основу побудови математичної моделі закладено загальноприйняті передумови (рис. 2). У моделі використано характеристики силових і пружних зв'язків, одержані дослідним шляхом на натурних пристроях.

Величина сили зчеплення визначається для кожного колеса залежно від швидкості руху і ковзання відповідних контактних поверхонь, нормального тиску та характеру його розподілу по зоні контакту при довільних профілях коліс і рейок з урахуванням їхнього взаємного розташування і фрикційного стану. Швидкість руху локомотива в поздовжньому напрямку визначається в процесі інтегрування диференціальних рівнянь руху, і на її величину ніяких обмежень не накладається.

У розрахунках ураховуються також електродинамічні процеси в тягових електродвигунах і поздовжні коливання вагонів у складі потяга.

Для складання диференціальних рівнянь руху використано рівняння Лагранжа другого роду у виді:

Збурююча дії від шляху задається незалежними функціями переміщення у вертикальній і горизонтальній площинах.



У моделі використано детерміновані збурювання у виді відомих синусоїдальних функцій з параметрами, що відповідають певному ступеню зношування або некруглостей коліс, а також випадкові збурювання – методом пропуску «білого шуму» через лінійний фільтр. Розв'язок рівнянь знаходиться в часовій зоні у виді відомого вектора стану. При моделюванні состава потяга залежно від кількості вагонів у математичну модель додається рівна кількість узагальнених координат.



За результатами інтегрування диференціальних рівнянь руху визначаються лінійні й кутові переміщення кузова, рам візків, колісних пар і тягових електродвигунів, сили зчеплення коліс із рейками, поперечні горизонтальні й вертикальні переміщення рейок, швидкості і прискорення тіл досліджуваної системи.

Моделювання силової взаємодії екіпажа тепловоза ТЕП 150 і рейкової колії виконано при розрахунковому навантаженні від колісної пари на рейки в 215 *кН* у швидкісному діапазоні від 40 до 200 *км/год* при русі в прямих і кривих ділянках колії з радіусом 300, 600 і 1000 *м*.

Результати розрахунків динамічних процесів за наведеною математичною моделлю тестувалися шляхом порівняння з результатами ходових динамічних випробувань тепловоза ТЕП 150, проведених відділом випробувань ВАТ «ХК «Луганськтепловоз». Результати порівняння показали задовільну збіжність за коефіцієнтами вертикальної і горизонтальної динаміки, рамними силами, вертикальними силами у буксовому підвішуванні, взаємним переміщенням елементів екіпажа і кузова, вертикальними і горизонтальними прискореннями візків і кузова. Розбіжність результатів за основними показниками не перевищує 15*%* (табл. 1).

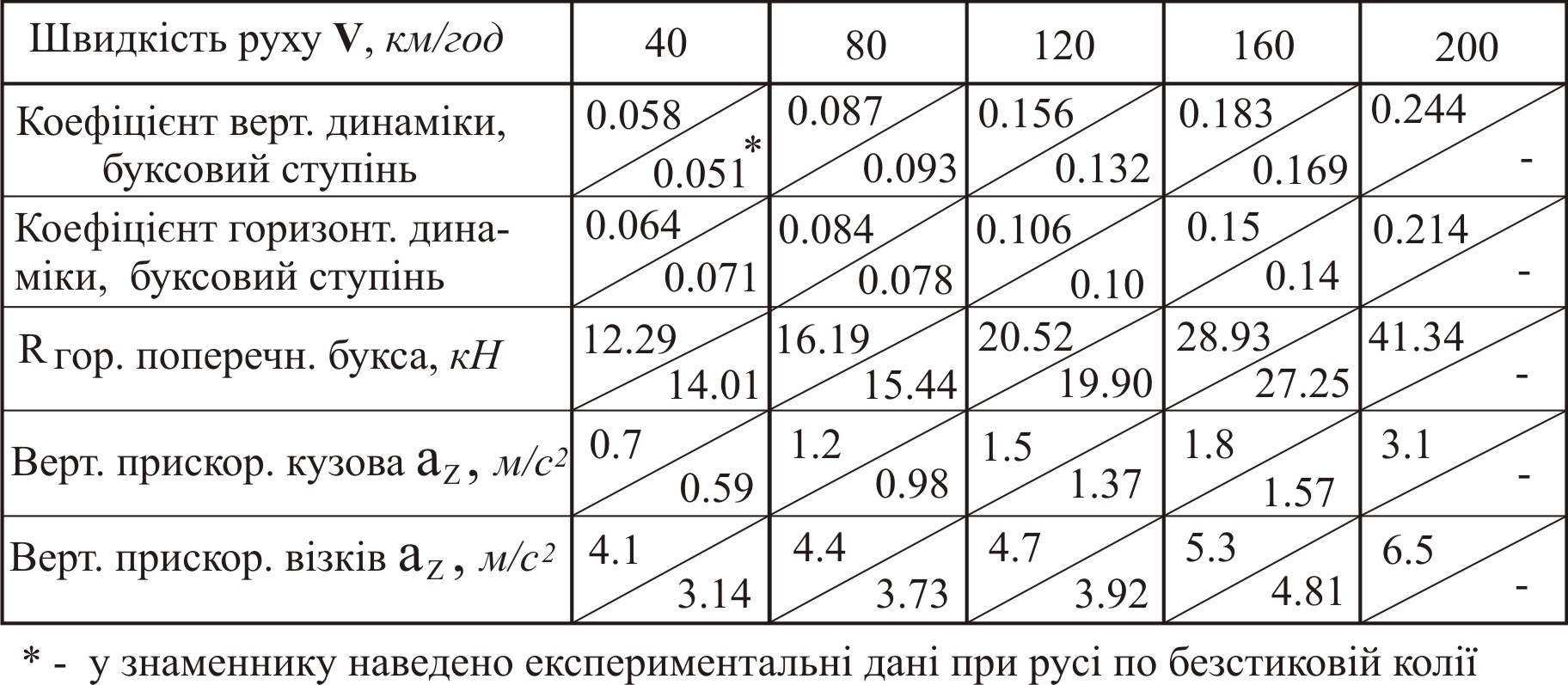
Розрахунки й експериментальні дослідження показали, що екіпаж тепловоза ТЕП 150 за динамічними показниками відповідає нормативним вимогам: коефіцієнти вертикальної й горизонтальної динаміки не перевищують припустимих значень у швидкісному діапазоні до 160 *км/год.*

Моделюванням руху в прямих ділянках колії встановлено, що при взаємодії коліс зі зношеним профілем і новими рейками спостерігається незначний ріст вертикальних динамічних сил (≤ 5*%*), однак збільшуються динамічні горизонтальні і рамні сили, горизонтальні поперечні прискорення і переміщення (на 15...30*%*).

При русі локомотива, що має колеса із прокатом 5 *мм*, у кривих ділянках по нових рейках і колії в "гарному стані" збільшення показників горизонтальної динаміки не перевищує 10*%*, проте із погіршенням стану рейкової колії вплив зношування коліс на вказані показники значно зростає і сягає рівня 35*%*.

Таблиця 1

**Зіставлення результатів розрахунку і експериментальних даних за основними динамічними показниками екіпажа тепловоза ТЕП 150**



Моделюванням руху в кривих ділянках шляху радіусом 300, 600 і 1000 *м* при різних швидкостях руху і стандартних профілях коліс і рейок встановлено, що бічні і рамні сили, поперечні прискорення кузова і візків монотонно зростають із ростом швидкості руху і визначаються величиною моменту опору повороту візка щодо кузова в плані. Підвищений момент від сил тертя між ковзунами й полімерними накладками в опорних пристроях кузова на візки стало негативно впливає на рівень горизонтальних сил у системі “екіпаж-колія”, ріст бічних і рамних сил становить від 11 до 27*%*.

Встановлено математичним моделюванням, що для опорних пристроїв кузова на візки екіпажа раціональною величиною коефіцієнту тертя є 0,05...0,07, що зменшує тривалість і рівень силової взаємодії між колісьми і рейками в горизонтальній площині при русі в кривих і прямих ділянках колії.

Моделювання руху в режимі екстреного гальмування при стандартних чавунних і дослідних С-С колодках показало, що застосування пропонованих колодок дозволяє знизити натиснення у два рази при збереженні довжини гальмівного шляху, а також зменшити його при високих швидкостях руху. Стабільний і високий коефіцієнт тертя фрикційного спряження “гальмівна С-С колодка - колесо” дозволяє використати автоматизовану систему управління процесом гальмування, значно зменшити величину дійсного гальмівного шляху і термічний вплив на поверхню катання колеса.

Аналіз результатів математичного моделювання і експериментальних досліджень показав, що для підвищення ефективності гальмування та зниження інтенсивності зношування елементів системи “гальмівна колодка - колесо - рейка” необхідні нові фрикційні матеріали колодок з достатньо високим і стабільним коефіцієнтом тертя, котрі не спричиняли б руйнуючої термічної дії на поверхню катання коліс. Для підвищення зчеплення шляхом поліпшення умов взаємодії в системі “колесо - рейка” необхідно вдосконалювати візкові рейкові екіпажі з метою зниження моменту опору повороту візків щодо кузова в плані створенням і використанням в опорно-повертальних пристроях антифрикційних матеріалів з достатньо низьким і стабільним коефіцієнтом тертя.

**Четвертий розділ** присвячений питанням теорії, розробки методів розрахунку і удосконалення фрикційних С-С композитів для гальмівних колодок і накладок механічних гальмівних систем рухомого складу. Аналіз досліджень указує на істотну залежність для відомих матеріалів основного вихідного параметра фрикційного спряження - реалізованого коефіцієнта тертя - як миттєвих, так і середніх його значень, від рівня контактних напружень, швидкості ковзання і температури на поверхні тертя. Температурна напруженість контактної поверхні є інтегральним показником роботи сил тертя на контакті, що визначається питомим навантаженням і відносною швидкістю ковзання, а також теплофізичними властивостями матеріалу гальмівних колодок, зокрема, теплопровідністю.

Ця проблема є однією з найбільш актуальних як для колодкових, так і для дискових гальмівних пристроїв, оскільки при русі на затяжних спусках температура колодок у зоні взаємодії з колесом може досягати більше 1000°*С*, що відповідає важкому й надважкому режимам роботи фрикційного спряження, а в дискових гальмах у зоні плям припікання фактична температура досягає 800…1000*°С.*

У таких складних щодо температурної напруженості умовах можуть використовуватися фрикційні вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (C-C композити), які являють собою вуглецеву матрицю, зміцнену вуглецевими волокнами. Механічними, фізичними й термічними властивостями композитів можна управляти шляхом зміни відповідних параметрів армуючого каркаса: орієнтацією волокон, об'ємним вмістом і кроком волокон по напрямках, щільністю каркаса, типом ниток і видом волокон, а також вибором матриці та способу виготовлення.

Початковими матеріалами для вуглецевих волокон є віскозні і поліакрилнітрильні (ПАН) волокна, які після високотемпературної обробки (карбонізація і графітизація) набувають високих міцнісних та пружних характеристик, термостійкості, стійкості до атмосферного впливу і хімічних реагентів.

Ущільнення багатонаправлених структур виконується методом осаджування вуглецю з газоподібного вуглеводню в спеціальних термоградієнтних газофазних установках типу АГАТ-1.6 і АГАТ-2.0 у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут». При цьому було використано метод радіально рухомої зони піролізу, наукові основи і реалізація якого запропоновані проф. В.А. Гуріним.

Запропоновано теорію і методику розрахунку пружних технічних констант просторово армованих КМ, що враховують ступінь армування і для яких початковими даними є модуль пружності, модуль зрушення і коефіцієнт Пуассона армуючих волокон і матриці (зв’язуючого) .

Визначення коефіцієнтів матриці піддатливості виконано методом Крамера шляхом розв'язку лінійних рівнянь закону Гука, що містять коефіцієнти жорсткості щодо деформацій і , представлених системою рівнянь (17), котра розпадається на дві незалежні системи для визначення й , кожна з яких розв'язується окремо:



Розв'язком системи рівнянь визначаються модуль пружності, модуль зрушення і коефіцієнт Пуассона просторово армованого композиту (рис.3). Реалізація методики розрахунку виконується програмним модулем, що враховує параметри початкових матеріалів і тип матриці.

Випробування показали, що С-С композити мають унікальні фрикційні властивості: коефіцієнт тертя при температурі в контакті 15 ... 20°*С* становить 0,2...0,3 і зі зростанням температури контактної поверхні тертя не зменшується, як у серійних фрикційних матеріалів, а збільшується до значень ≈ 0,4...0,6 і стабілізується при температурі більше 400°*С*.

З метою забезпечення достатнього і стабільного коефіцієнта тертя гальмівних колодок розроблено технологічні схеми і способи виготовлення модифікованих С-С композитів, у яких використано модифікатори тертя: оксид алюмінію (Al2O3), карбід бору (B4C) двох фракцій – грубозернистої й дрібнозернистої, а також дрібнодисперсний аморфний бор.

Експериментальні дослідження міцнісних, теплофізичних і триботехнічних характеристик «чистих» і модифікованих С-С композитів було проведено на дослідних і натурних зразках з різним вмістом (*%* по масі) вуглецевих волокон, піровуглецю, сітки з мідного дроту та модифікаторів тертя, – різних за типом і фракційним складом.

Вдосконалення технологічних схем виготовлення і використання нових перспективних технічних рішень дозволили зменшити собівартість виробництва фрикційних С-С композитів до рівня, що не перевищує двократної вартості звичайних композиційних матеріалів.

**У п'ятому розділі** наведено результати експериментальних досліджень експлуатаційних характеристик і ефективності використання гальмівних колодок із С-С композитів. Попередні випробування проводилися на стандартній машині тертя моделі СМЦ-2, а доводочні з натурними колодками – на спеціальній стендовій установці, що реалізує схему «обертовий вал – гальмівні колодки». При створенні експериментальної установки використано нові технічні рішення, зокрема гальмівні колодки мали два ступеня рухомості – за напрямом дії нормального зусилля притиснення і разом з контртілом – у напрямі обертання останнього під впливом сили зчеплення.

Для реєстрації вихідних параметрів процесу гальмування розроблено вимірювальну систему на базі персональної ЕОМ з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) і керуюча програма (АDC) на мові програмування Delphi для роботи в операційних системах Windows.

Всі випробування проводилися як порівняльні за ідентичних умов і режимів навантаження. Для випробувань було прийнято: чавунні колодки виробництва «ХК «Луганськтепловоз»); ЕМ-2 (6КВ-10) за ГОСТ 15960-70; 6КХ-1Б за ТУ 38-5-560-69; ретинакс А і Б (ФК-16А і ФК-24А) за ГОСТ 10851-73; стрічка азбестова типу Б і полімерний композит ТР-9 тощо.

Після попередніх випробувань серійних матеріалів і модифікованих С-С композитів, що відрізняються типом вуглецевих волокон і структурою зміцнюючого каркаса, видом модифікатора тертя, кількісним і фракційним складом останнього, для доводочних випробувань було прийнято дев'ять типів найбільш перспективних композицій. Процес ущільнення піровуглецем проводився в потоці природного газу методом радіально рухомої зони піролізу, після чого заготовки піддавалися механічній обробці і шліфуванню робочої поверхні тертя алмазними дисками.

Основними показниками для порівняння ефективності гальмівних колодок були прийняті величина і характер зміни коефіцієнта тертя залежно від інтегрального фактора - температури на контактній поверхні тертя, що узгоджується з вимогами Бюро експлуатаційних випробувань Міжнародного союзу залізниць (БЕВ МСЗ). Для обробки результатів випробувань гальмівних колодок із С-С композитів використано методи математичної статистики і теорії ймовірностей (рис. 4).

Аналіз результатів випробувань показав, що математичне очікування величини коефіцієнта тертя за початкової температурі 20°*С* становить 0,451 і змінюється від 0,366 до 0,536 у межах , що становить 99,7*%* спостережуваних значень, а в межах змінюється від 0,395 до 0,507, що становить 95,4*%* отриманих експериментальних даних. Отже, модифіковані аморфним бором композити мають достатній початковий коефіцієнт тертя при температурі 20°*С* , однак особливо важливим є його стабілізація на рівні 0,45...0,55 у широкому діапазоні зміни температури поверхні тертя (20…500˚*С* – за умовами випробувань).



Фрикційна характеристика модифікованих аморфним бором С-С композитів (рис. 5), отримана методом математичного планування експерименту з урахуванням впливу питомого навантаження ( , *МПа*), швидкості ковзання на контакті (, *м/с*) і температури (, °*C*), має вид:



Аналіз результатів показав, що з ростом швидкості ковзання і питомого навантаження величина коефіцієнта тертя повільно зменшується, а з ростом температури контактної поверхні теж повільно, але збільшується.

Порівняння фрикційних властивостей модифікованих С-С композитів з металокерамічними (BM-41) і композиційними гальмівними колодками (929-1G) фірми «BECORIT» (рис. 6), сертифікованими МСЗ для використання на рухомому складі Європейських залізниць, свідчить про їхню відповідність існуючим вимогам.

Ресурсні випробування з визначення зносостійкості проводилися за єдиною і ідентичною програмою навантаження; величина зношення визначалася масовим методом з подальшим перерахунком на лінійне зношення, при цьому контактна поверхня тертя становила не менш 80*%* від площі колодки.

Особливо високою зносостійкістю відрізняються модифіковані С-С колодки, які мають зношування контактної поверхні в 6...9 разів менше звичайних фрикційних матеріалів і в 2,1...2,7 рази менше, ніж у існуючих композиційних колодок. Також встановлено, що найбільше руйнують матеріал контртіла (колісна сталь марки 2 - бандажі колісних пар) чавунні гальмівні колодки, при цьому зношування поверхні контртіла в 1,3...1,7 раза вище, ніж за модифікованих і «чистих» С-С колодок.

Розрахунки дійсного гальмівного шляху (SД) тепловоза ТЕП 150 (рис. 7, а) за методикою ПТР при екстреному гальмуванні на площадці з швидкості 160 *км/год* при послідовному використанні стандартних чавунних колодок (1\*), з підвищеним вмістом фосфору (2\*), композиційних (3\*) і С-С колодок (4\*) показали, що нові С-С колодки забезпечують зменшення гальмівного шляху в порівнянні із чавунними більш ніж у два рази, а з композиційними - на 8...10%.

Математичним моделюванням просторового руху локомотива з составом потяга (рис.7, б) по чистих і сухих рейках у режимі гальмування із чавунними і С-С колодками встановлено, що незалежно від фрикційних умов у контакті коліс із рейками для досягнення однієї й тієї ж величини гальмівного шляху необхідна величина натискання на С-С колодки є у два раза меншою. Отже, модернізація рухомого складу може бути виконана простою заміною серійних композиційних колодок на С-С колодки.

Пропоновані гальмівні С-С колодки за своїми технічними і трибологічними характеристиками не поступаються кращим зразкам сучасних фрикційних матеріалів, а здатністю витримувати високу температурну напруженість на контактній поверхні тертя і забезпечувати достатньо високий і стабільний рівень коефіцієнта тертя перевершують останні.

Розрахунки, експериментальні дослідження і пробні поїздки свідчать, що нові С-С колодки істотно підвищують ефективність процесу гальмування рейкового рухомого состава й одночасно справляють менш руйнівну механічну і термічну дію на поверхню катання коліс на гальмівних осях.

**У шостому розділі** наведено результати експериментальних досліджень теплофізичних параметрів гальмівних C-C колодок з різними схемами зміцнюючих каркасів для рейкового рухомого складу, визначено основні закономірності виділення теплоти і представлено постановку та результати чисельного вирішення нестаціонарної теплової задачі теплопровідності для системи “гальмівні колодки – колесо – рейка”.

У зв'язку зі складністю теоретичного опису механізму інтегральної теплової провідності в середовищі - композиті для визначення теплопровідності використовувалися емпіричні методи. На спеціальній стендовій установці випробуванням піддавалися дослідні зразки матеріалу С-С колодок, а в якості еталонного було використано чавунний зразок з відомою теплопровідністю.

Для оцінки впливу на теплопровідність С-С композитів різних наповнювачів всі дослідні зразки виготовлялися на основі вуглецевої тканини і піровуглецю, а як модифікатор до складу №1 було включено мідний дріт, до складу №2 - карбід бору, до складу №3 - бор аморфний.

Емпіричні залежності впливу якісного складу компонентів і їхнього процентного вмісту по масі на коефіцієнт теплопровідності С-С колодок отримано методом математичного планування експерименту. Характер зміни величини коефіцієнта теплопровідності від домінантних факторів (рис. 8) і емпіричні залежності мають вид:

Погрішність апроксимації становить не більше ± 6,5% при довірчій імовірності .



Встановлено, що для складу №1 коефіцієнт теплопровідності в досліджених діапазонах факторів впливу монотонно зростав від 34,3 до 45,6 *Вт/(м*М*К)*.

Для складу №2 коефіцієнт теплопровідності менше і діапазон зміни становив 22...36 *Вт/(м*М*К)*, що пояснюється відсутністю мідного компонента. Склад №3 характеризується найбільш складним механізмом теплової провідності, однак забезпечує високе середньотемпературне значення коефіцієнта теплопровідності – 34 *Вт/(м*М*К)*.

Слід зазначити, що високу теплопровідність – 35...55 *Вт/(м*М*К)* мають серійні чавунні гальмові колодки, а з підвищеним вмістом фосфору і колодки типу Samson (P30) – 21...28 *Вт/(м*М*К)*; композиційні колодки виробництва «ФРИТЕКС» типу ТIIР характеризуються величиною 0,8...3,3*Вт/(м*М*К)*. Згідно із зарубіжними джерелами, композиційні і металокерамічні колодки мають цей показник на рівні 1,3 і 7,5 *Вт/(м*М*К)*.

Отже, нові С-С колодки з величини коефіцієнта теплопровідності незначно поступаються чавунним і мають більш високі показники в порівнянні з іншими фрикційними матеріалами.

В основі моделювання нестаціонарних теплових процесів у твердих тілах лежить рівняння нестаціонарної теплопровідності. Для сплощених тіл, а такими прийняті ходові колеса, відповідне рівняння має вид:

Гранична умова другого роду в зоні контакту колеса з рейкою, а також на поверхні контакту колеса з колодкою задавалася у виді густини нестаціонарного теплового потоку

Тепловий потік у плямі контакту визначався з умови пропорційності теплового потоку, що виділяється в плямі контакту, потужності сил деформації колеса та рейки: *Qк*. = *е∙Е1N* , а було прийнято рівним коефіцієнту дисипації механічної енергії при деформації. Роботу сил одиничної деформації *Е01* з урахуванням її нестаціонарності було знайдено у виді



У припущенні пропорційності потужності енерговиділення деформації на даному режимі руху обсягу деформованого матеріалу за одиницю часу було отримано розрахункову формулу

Зазначені у виразах (24) і (25) змінні визначені за результатами розв'язку рівнянь динамічної контактної задачі у виді апроксимаційних залежностей.

Тепловий потік при зміні швидкості руху в процесі гальмування визначався інтерполяцією значень функцій, отриманих при реперних значеннях швидкостей V = 40, 80, 120, 160 *км/год* (при убуванні швидкості до значень, менше 40 *км/год* відповідно екстраполяцією).

Тепловий потік *Qкк*, що надходить від плями контакту в колесо, приймався рівним 0,5*Qк* відповідно до рекомендацій проф. О.Л. Голубенка. Тепловий потік у зоні тертя колодки об колесо при гальмуванні задавався для кожної ої ділянки згідно з виразом



Розподіл потоків теплоти між колесом і колодкою визначався коефіцієнтом , запропонованим проф. В. Г. Іноземцевим.



Для розв'язку нелінійного диференціального рівняння 2-го порядку (22) використовувався метод кінцевих різниць, при цьому площина колеса у декартових координатах *ХУ* розбивалася квадратною сіткою (рис. 9). Рівняння (22) для довільної точки (*xi,yj,фk*) поверхні колеса (у момент часу *фk*), а також граничні умови (23) приводились до кінцево-різницевого виду. Результати вирішення теплової задачі (графіки та комп’ютерні екранограми) наведено на рис.10 - 12.

Згідно з результатами чисельного розв'язку рівняння (22) із граничними умовами (23) для випадку руху з постійною швидкістю = 160 *км/год* і при = 0 °*С* сталий перегрів поверхні катання коліс локомотива ТЕП 150 відносно атмосферного повітря склав 58 °*С*, при цьому максимальна температура в зоні контакту з рейкою не перевищувала 240 °*С.* Значення зазначених вище параметрів у режимі гальмування двома колодками із зусиллям натиснення 40 *кН* становило відповідно: для серійних композиційних колодок 462 °*С* і 563 °*С*; для стандартних чавунних та з фосфористого чавуну 235 °*С* і 345 °*С* та 249 °*С* і 363 *°С*, для дослідних С-С колодок 380 °*С* и 482 *°С*. При цьому температурна залежність для плями контакту має істотно нестаціонарний характер внаслідок нестаціонарності теплового потоку від гармонійних деформацій.



Найбільший перегрів при гальмуванні було зафіксовано на контактній поверхні тертя “колодка - колесо” (рис. 10 і 11). Цей показник становив для серійних композиційних колодок 796 °*С*; для стандартних чавунних - 325°*С*, для фосфористого чавуну - 345 °*С*; і для дослідних С-С колодок - 668°*С*.

Як випливає з аналізу результатів чисельних досліджень, дослідні гальмівні С-С колодки мають перевагу в порівнянні із серійними композиційними колодками з усіх термічних показників, що характеризують протікання теплових процесів у системі «гальмівна колодка-колесо-рейка» і можуть позитивно впливати на елементи вказаної системи (рис. 11, 12). Так, модифіковані С-С колодки дозволяють зменшити температурну напруженість контактного спряження пари тертя “колодка - колесо” на 20% у порівнянні із серійними композиційними гальмівними колодками.

Результати моделювання нестаціонарного теплового процесу підтверджено експериментальними дослідженнями на стендовій установці та добре узгоджуються з даними, наведеними в роботах проф. В.Г. Іноземцева для стандартних чавунних і серійних композиційних колодок.

Встановлені закономірності і математичні моделі дозволяють створювати і використовувати перспективні фрикційні матеріали з високими теплофізичними властивостями, що сприяє значному підвищенню ефективності гальмування рейкового рухомого складу поліпшенням умов взаємодії в системі “гальмівна колодка - колесо - рейка”, збільшенню довговічності і терміну служби як окремих елементів, так і системи у цілому.

**Сьомий розділ** присвячено поліпшенню експлуатаційних характеристик та властивостей вузлів тертя в зчленуванні кузова і візків екіпажа з метою поліпшення характеристик і умов взаємодії рухомого складу і колії. Зчленування кузова і візків здійснюється за допомогою опорно-повертальних (ОПП) і шкворньових пристроїв. Кінематичні зв'язки дозволяють рамі візка переміщуватись щодо кузова на деяку величину *d*max і повертатися на деякий кут , що сприяє зниженню силової взаємодії колеса і направляючої рейки в контактній зоні. При завищеному значенні моменту тертя в опорних пристроях утрудняється поворот візків щодо кузова в плані при вписуванні в криві, а при русі в прямих ділянках шляху спостерігається рух візків з перекосом. При цьому значно збільшується не тільки силовий вплив екіпажа на колію, але й тривалість взаємодії гребенів коліс із рейкою, що викликає інтенсивне зношування контактних поверхонь.



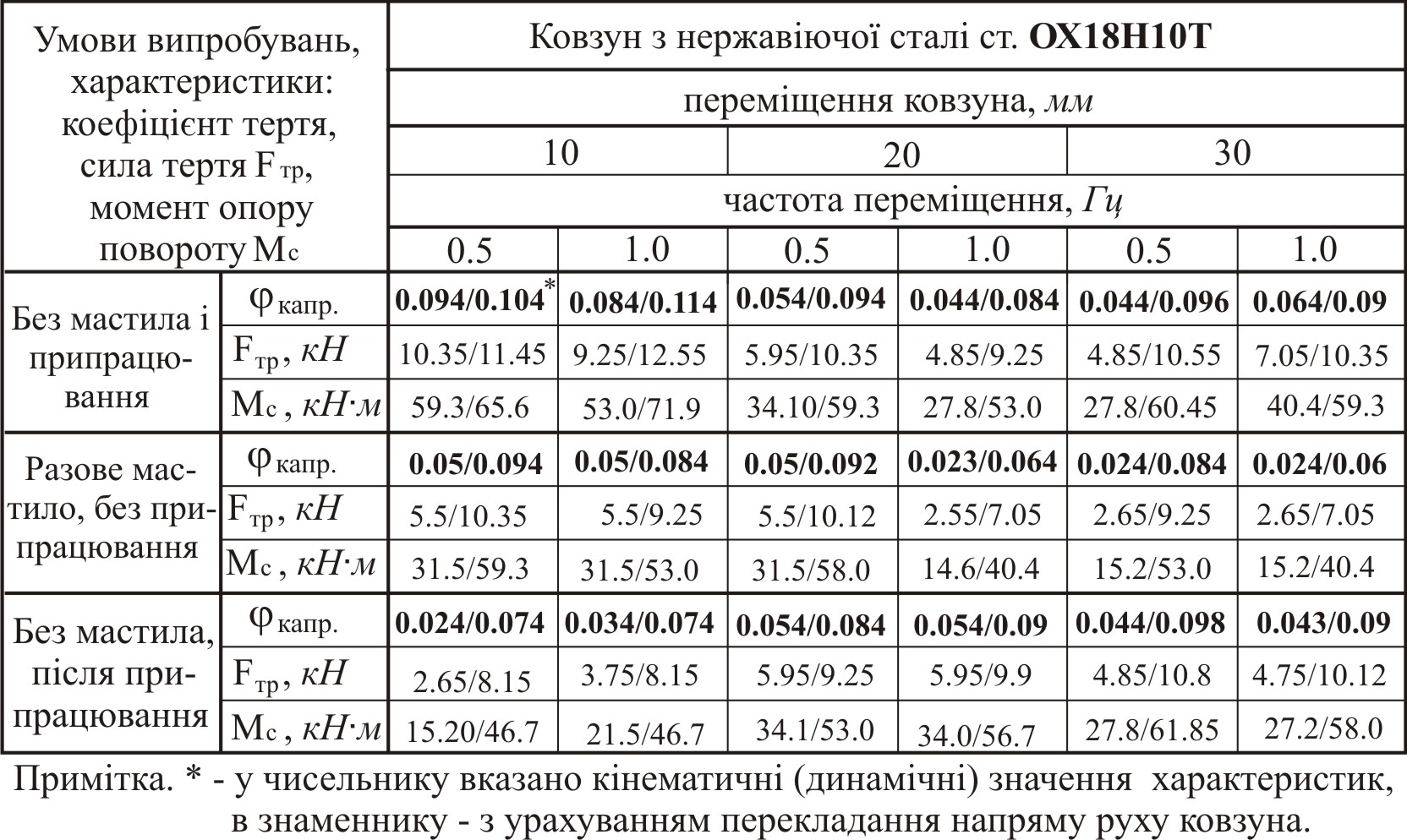
Аналіз умов роботи ОПП тепловоза ТЕП 150 показав, що основною складовою моменту опору повороту є момент від сил тертя на контактній поверхні “ковзун - полімерна накладка”. Отже, необхідно забезпечити спряження головної пари тертя ОПП з досить низьким і стабільним коефіцієнтом тертя, раціональна величина якого за результатами моделювання руху екіпажа тепловоза ТЕП 150 встановлена в діапазоні 0,05...0,07, що підтверджено поїзними випробуваннями тепловоза 2ТЕ116.

Використовуючи основні трибологічні принципи і ґрунтуючись на сучасних полімерах, розроблено технологічні схеми та способи виготовлення самозмащувальних матеріалів на основі капролону з наповнювачами у виді мінерального масла, дисульфід молібдену й лускатого графіту.

Для експериментальних досліджень на стендовій установці, що імітує експлуатаційні умови за величиною і частотою прикладення вертикального і горизонтального навантажень, а також швидкості ковзання, були виготовлені натурні дослідні зразки з таких матеріалів: фторопласт-4, триболіт на основі вуглецевої тканини ВТФ, триболіт на основі бавовняної тканини БТФ, С-С композити з піровуглецевою матрицею, капролон В «У» маслонаповнений і графітонаповнений (табл. 2).

Таблиця 2

**Результати випробувань головної пари тертя опорних пристроїв тепловоза ТЕП 150 з полімерними накладками із графітонаповненого капролону**



Попередніми міцнісними випробуваннями встановлено, що весь спектр навантаження успішно витримують тільки полімерні накладки на основі капролону, які й було рекомендовано для ресурсних випробувань протягом 30 годин, що відповідає умовному пробігу в 300 *тис. км*. При ресурсних випробуваннях самозмащувального графітонаповненого капролону В «У» отримано результати, досить близькі до характеристик маслонаповненої композиції.

Експериментальними дослідженнями натурних антифрикційних самозмащувальних матеріалів на основі капролону В, виготовлених за новою технологією і компонентним складом, встановлено, що ці матеріали мають достатні міцнісні та зносостійкі властивості, забезпечують стабільний коефіцієнт тертя в межах 0,05…0,07 у температурному діапазоні до 100˚С і можуть ефективно використовуватися в опорно-повертальних пристроях рухомого складу з одноразовим введенням рідкого мастила при початковій установці опорних пристроїв на рухомий склад. Слід зазначити, що в процесі експлуатації не потрібне додавання змащення в опорні пристрої.

Вдосконалення експлуатаційних характеристик опорних пристроїв дозволяє істотно (до 32*%*) зменшити момент опору повороту візків щодо кузова, кінематичну і силову взаємодію колеса з рейкою, а також роботу сил тертя в контактній зоні.

**ВИСНОВКИ**

У дисертації вирішено актуальну науково-технічну проблему підвищення ефективності гальмування рейкового рухомого складу поліпшенням умов взаємодії коліс із гальмівними колодками і рейками шляхом розвитку теорії та знайдення науково обґрунтованих технічних рішень, що забезпечують підвищення ефективності роботи гальмівних і опорно-повертальних пристроїв, зниження інтенсивності зношування елементів системи “гальмівна колодка - колесо - рейка” і підвищення строку їхньої служби. Теоретичні положення, математичні моделі і методи вирішення динамічних контактних задач взаємодії коліс із рейками, а також установлені закономірності контактної, фрикційної, динамічної і теплової взаємодії елементів у системі дозволили створити наукові основи поліпшення характеристик і умов взаємодії рухомого складу і колії.

За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень зроблено такі висновки.

Одержала подальшого розвитку математична модель динамічної контактної взаємодії колеса і рейки з урахуванням осциляції ядер інтегральних рівнянь, принципу граничного поглинання і гармонійного збурення, що дозволило уточнити величину і характер розподілу контактних напружень.

Уперше отримано теоретичне вирішення динамічної контактної задачі щодо вертикальних коливань колеса на пружній ізотропній рейці з використанням точної факторизації ядра інтегрального рівняння, що дозволило одержати аналітичні залежності для кутів зрушення фаз і модуля комплексної амплітуди коливань колеса.

Отримано інтегральні рівняння для розв'язку контактних задач щодо руху колеса по пружній рейці і щодо руху клина в пружному шарі - рейці, що дозволяє виконати уточнені розрахунки колеса та рейки на міцність і жорсткість, а також прогнозувати розвиток тріщин і виконувати розрахунки на ресурс по втомному руйнуванню.

З урахуванням динамічного характеру вертикальної компоненти контактних напружень удосконалено просторову математичну модель руху локомотива із составом потягу, що дозволяє виконати поглиблені дослідження процесів силової контактної взаємодії колеса з рейкою. Моделюванням руху екіпажа встановлено, що підвищення ефективності гальмування і поліпшення умов взаємодії рухомого складу і колії найбільш раціональним чином можуть бути досягнуті завдяки створенню і використанню принципово нових фрикційних матеріалів у системі колодкового гальмування, що спричиняють зниження теплонапруженості, зменшення зношування і руйнуючого впливу колодок на поверхню катання коліс, а також застосуванням в опорних пристроях антифрикційних матеріалів з низьким коефіцієнтом тертя для зменшення моменту опору повороту візків щодо кузова в плані.

Розроблено теоретичне обґрунтування, компонентний склад, структура, технологічні схеми виготовлення і конструктивне виконання нових гальмівних С-С колодок на основі вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів з піровуглецевою матрицею і модифікаторами тертя, які характеризуються високими та стабільними експлуатаційними властивостями в умовах зміни температури в широкому діапазоні. Уперше встановлено закономірності впливу на фрикційні характеристики якісного, кількісного й фракційного складу різних компонентів і модифікаторів тертя, що дозволяє створювати перспективні гальмівні колодки із заданими параметрами.

Уперше встановлені фрикційні характеристики гальмівного спряження “колісна сталь марки 2 – С-С колодки” у виді емпіричних залежностей від температури поверхні тертя, швидкості ковзання і питомого навантаження, які використовуються для розрахунків гальмівного шляху, часу гальмування та уповільнення, а також для створення автоматизованої системи регулювання і управління процесом гальмування.

Експериментальним шляхом визначено закономірності впливу різних компонентів і їхнього масового вмісту на коефіцієнт теплопровідності С-С колодок, що дозволяє створювати перспективні гальмівні колодки, котрі сприяють інтенсивному відводу теплоти із зони тертя і зменшують температурну напруженість на 20% і більше в порівнянні із серійними композиційними. Встановлено, що гальмівні С-С колодки, модифіковані гібридним зміцнюючим каркасом з мідною сіткою, карбідом бору та бором аморфним, мають коефіцієнт теплопровідності 20...48 *Вт/(м·К)*, при середньотемпературному значенні відповідно 40, 29 та 34 *Вт/(м·К)*, що значно перевищує аналогічні показники колодок типу ТІІР або фірми «BECORIT» – 0,8…3,3 *Вт/(м·К)*.

Поставлено й вирішено методом кінцевих різниць теплову задачу нестаціонарного теплообміну в системі “гальмівні колодки – колесо – рейка”. Моделюванням встановлено часові і швидкісні характеристики зміни температури у фрикційних і контактних зонах для режимів руху, зупинного і екстреного гальмування в умовах застосування різних гальмівних колодок. Дослідні С-С колодки мають перевагу в порівнянні з композиційними до 20% по всіх термічних показниках. Перегрів поверхні тертя “колодка – колесо” у випадку екстреного гальмування на площадці тепловоза ТЕП 150 з початкової швидкості 160 *км/год* і натисненні на колодку 40 *кН* при роботі з композиційними колодками отримано на рівні 800*°С*, для чавунних і фосфористих колодок – 325 і 345*°С*, а для С-С колодок – 668*°С*.

Математичне моделювання просторового руху локомотива із составом вагонів без заклинювання коліс, експерименти та пробні поїздки показали, що незалежно від фрикційних умов у контакті коліс із рейками для досягнення однієї й тієї ж величини гальмівного шляху натиснення на С-С колодки має бути у два рази менше, ніж для чавунних колодок. Дійсний гальмівний шлях при розрахунках за методикою ПТР і гальмуванні С-С колодками більш ніж у два рази менше, ніж при чавунних колодках, і на 8...10% менше, ніж при використанні серійних композиційних колодок.

Розроблено компонентний склад, структуру і засоби виготовлення антифрикційних самозмащувальних композиційних матеріалів на основі капролону В «У» з наповнювачами у виді мінерального масла, дисульфід молібдену й лускатого графіту, що характеризуються низьким і стабільним коефіцієнтом тертя в межах 0,05...0,07 при температурному режимі контактної поверхні тертя в діапазоні до 100°*С*.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що для полімерних накладок на основі капролону достатнім є введення рідкого мастила на поверхню тертя при початковій установці. Зниження моменту тертя в опорних пристроях становить більше 30 *%* у порівнянні з серійними, що поліпшує умови взаємодії коліс із рейками при русі в кривих і прямих ділянках шляху, зменшує силовий вплив, роботу сил тертя, інтенсивність зношування та підвищує термін служби коліс і рейок.

Розроблено і створено лабораторні, стендові та натурні експериментальні установки з вимірювально-реєструючими комплексами і програмним забезпеченням для проведення комплексних експериментальних досліджень, результати яких дозволили виконати оцінку адекватності теоретичних положень і розроблених математичних моделей реальним процесам у системі “гальмівна колодка - колесо - рейка”, при цьому розбіжність результатів з експериментальними даними не перевищує 15 %.

Практична цінність роботи підтверджена актами впровадження отриманих результатів «ХК «Луганськтепловоз» і ВАТ «ЛуганськПТІмаш» при створенні тепловоза ТЕП 150, у процесі проектування і розробки тепловозів, дизель - і електропоїздів ДПЛ-2, ДЕЛ-02, ЕПЛ 9Т, трамвайних вагонів. Економічний ефект від впровадження результатів наукової роботи наразі уточнюється в процесі дослідної експлуатації виробів з нових матеріалів на рухомому складі.

Основні наукові результати дисертаційної роботи використовуються в науково-дослідній роботі і навчальному процесі при підготовці бакалаврів, фахівців, магістрів і аспірантів за фахом «Рухомий склад і спеціальна техніка залізничного транспорту» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

**СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ**

1. Старченко В.Н. Некоторые вопросы теории контактного взаимодействия колеса и рельса / СНУ ім. В. Даля. – Луганськ: 2006. – 120 с. – Библиогр.: С. 112–117.

2. Старченко В.Н., Бурка М.Л., Сидоров Н.П. Особенности характеристик сдвига резинометаллических опор кузова тепловоза // Конструирование и производство транспортных машин: Респ. межвед. научн.-техн. сб. Вып. 21. – Харьков: Вища щкола. 1989. – С. 41– 45.

3. Старченко В.Н., Шевченко С.И., Хухлей С.К. Новые конструкции тормозов транспортных машин // Вестник Восточноукраинского государственного университета, отдельный выпуск. Транспорт. – Луганськ, 1996. – С. 19–23.

4. Старченко В.Н., Шевченко С.И., Белоус В.В. К вопросу исследования тормозных устройств с колодками плавающего типа // Cер. Транспорт: Зб. наук. праць СУДУ, юбил. выпуск. – Луганськ, 1998. – С. 73–80.

5. Старченко В.Н., Шевченко С.И., Белоус В.В. О возможности применения аналого-цифровых преобразователей при экспериментальных исследованиях // Вісник СУДУ. – Луганськ, 2000. – №6 (28). – C. 36-40.

6. Старченко В.Н. К вопросу о трении и сцеплении при взаимодействии колеса с рельсом // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. – Луганськ, 2003. – №9 (67). – С. 129-135.

7. Старченко В.Н. Трение и сцепление при взаимодействии колеса с рельсом в процессе торможения // Сборник научных трудов НГУ. – Днепропетровск. Национальный горный университет, 2004. – Т. 4, №19. - С. 100-108.

8. Старченко В.Н., Полупан Е.В., Шевченко С.И. Повышение эффективности торможения использованием новых углерод-композиционных материалов // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2004. – №7[77]. Частина1. – С. 137-142.

9. Старченко В.Н., Шевченко С.И., Полупан Е.В. Исследование влияния характера нарастания тормозного момента на динамические нагрузки механизмов машин // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2004. – №7 (77). Частина 2. – С. 48-52.

10. Старченко В.Н. Динамическая контактная задача об угловых колебаниях жёсткого колеса на рельсе (часть 1) // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2004. -№8 (78), Частина 1. – С. 24-28.

11. Старченко В.Н. Динамическая контактная задача об угловых колебаниях жёсткого колеса на рельсе (часть 2, окончание) // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2004. - №8 (78), Частина 1. – С. 29-32.

12. Старченко В.Н., Полупан Е.В. Анализ влияния температуры трения на надёжность и долговечность работы тормозного устройства // Подъёмно-транспортная техника, № 1(9). – 2004. С. 49-53.

13. Старченко В.М., Поляков В.М. Випробування нових фрикційних матеріалів для гальмування транспортних засобів // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2004. – Випуск 9. – С. 283-287.

14. Старченко В.Н., Гурин В.А., Полупан Е.В., Гурин И.В. Триботехнические характеристики новых фрикционных материалов // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2005. – №8[90]. Частина1. - С. 121-126.

15. Старченко В.Н. Расчёт упругих характеристик пространственно армированных фрикционных углерод-углеродных композиционных материалов // Автомобильный транспорт: Сборник научных трудов. – Харьков: ХНАДУ. – 2005. – Вып. 16. – С. 117-122.

16. Старченко В.Н., Буряк В.Г. Пространственная динамическая смешанная задача о сдвиге упругого полупространства // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. - Луганськ, 2005. - №6 (88). - С. 51-56.

17. Старченко В.Н., Буряк В.Г. Динамическая контактная задача о взаимодействии колеса с рельсом // Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна.– Д.: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. транспорту. - 2005. – Вип. 8. - С. 170-175.

18. Старченко В.Н., Буряк В.Г. Динамічна контактна задача руху колеса по пружному шару // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ. – 2005. – Вип.2. - С. 121-124.

19. Старченко В.Н. Пространственная динамическая контактная задача для упругого полупространства // Збірник наукових праць НГУ. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. - 2005.– №21.- С. 21-28.

20. Старченко В.Н. Антифрикционные полимерные материалы для опорных устройств подвижного состава железных дорог // Наука, техника и высшее образование. Сб. научн. тр., Вып. 2. Изд-во Ростовского университета. - 2006. - С. 57-58.

21. Старченко В.Н., Гурин В.А., Быкадоров В.П., Шапран Е.Н. Фрикционные материалы на базе углерод-углеродных и углерод-асбестовых волокон для тормозных устройств // Железные дороги мира - 2006. –№ 2. - С. 38-42.

22. Старченко В.Н. Расчёт упругих характеристик фрикционных углеродных композитов для подвижного состава // Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. – Д.: ДНУЗТ. - 2006. Вип. 11. - С. 160-166.

23. Басов Г.Г., Старченко В.Н., Чесноков В.В., Нестеренко В.И., Бурка М.Л., Паранич А.А. Экспериментальные исследования новых материалов для опорно-возвращающих устройств подвижного состава // Збірник наукових праць НГУ.– Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. – 2006. – № 24. – С. 105-110.

24. Старченко В.Н., Полупан Е.В. Исследование теплового состояния фрикционных накладок тормозных устройств транспортных машин // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2006. - №7 (101). - С.56-61.

25. Голубенко А.Л., Старченко В.Н. Решение динамической контактной задачи с ограничением при взаимодействии колеса и рельса // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2006. - №8 (102), Частина 1. - С. 19-25.

26. Голубенко А.Л., Старченко В.Н., Гурин И.В. Фрикционные углерод-углеродные композиты для тормозных устройств подвижного состава // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. – Луганск, 2006. - №8 (102), Частина 2. - С. 256-261.

27. Старченко В.Н. Трибологические свойства фрикционных С-С композитов для тормозных устройств подвижного состава // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. – Луганськ, 2007. - № 6 (112). - С. 48-52.

28. Старченко В.Н. Контактные напряжения при динамическом взаимодействии колеса с рельсом // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. – Луганськ, 2007. - № 8 (114), Частина 1. - С. 59-63.

29. Старченко В.Н. Исследование теплофизических параметров фрикционных С-С композитов // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. – Луганськ, 2007. - № 8 (114), Частина 2. - С. 226-229.

30. Упругое колесо рельсового транспортного средства: А.с. 1659232. СССР. МКИ В60В 9/12 / Старченко В.Н., Бучный А.И. (SU). – № 4333909/11; Заявл. 15.10.87; Опубл. 30.06.91, Бюл. №24. – 5 с.

31. Двосекційна гальмова колодка: Патент на корисну модель 17933. Україна. МПК (2006) F16D 65/04 / Старченко В.М., Шевченко С.І., Полупан Є.В. (UA). № u 2006 04585; Заявл. 25.04.06; Опубл. 16.10.06, Бюл. №10. - 2 с.

32. Композитний матеріал на основі вуглець-вуглець для фрикційних елементів: Патент на винахід №82267. Україна. МПК С04В 35/83, С04В 35/52, F16D 69/00/ Старченко В.М., Полупан Є.В., Шевченко С.І. (UA). Заявл. 03.05.2006; Опубл. 25.03.08, Бюл. №6. – 4 с.

33. Старченко В.Н. Динамическая контактная задача о вертикальных колебаниях жёсткого колеса на упругом изотропном рельсе // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2005. – №8 (90). Частина 1. – С. 94-98.

34. Старченко В.М., Буряк В.Г. Динамічна задача про рух клина у пружному шарі // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, – 2005. – №21. – С. 16-21.

35. Старченко В.Н. Ограниченное решение динамической контактной задачи о взаимодействии колеса с рельсом // Збірник наук. праць НГУ. – Дніпропетровськ. Національний гірничий університет, – 2006. – №24. – С. 110-113.

36. Старченко В.Н., Шевченко С.И. Измерительная система для диагностики и испытания тормозных устройств транспортных машин // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2006. – №7 (101). – С. 193-196.

37. Старченко В.Н. Фрикционные углерод-углеродные композитные материалы для дисковых тормозов подвижного состава // Наука, техника и высшее образование: Сб. научн. тр. – Изд-во Ростовского университета. – 2006. – Вып. 2. – С. 57-58.

38. Старченко В.Н., Полупан Е.В. Тепловые процессы при колодочном торможении фрикционными С-С композитами // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. - 2007. - № 6 (112), Частина 2. – С. 227-230.

39. Старченко В.Н., Хухлей С.К., Шевченко С.И. Новое конструктивное решение тормозных устройств транспортных машин // Проблемы развития локомотивостроения: 5-я Межд. научн.-техн. конф., Алушта, октябрь 1995.

40. Старченко В.Н., Шевченко С.И., Хухлей С.К. Установка для диагностирования и испытания тормозных устройств транспортных машин //Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении: Межд. научн.-практ. конф.,Луганск, 1996.

41. Старченко В.Н., Шевченко С.И., Панфилов Д.А. Новая конструкция тормозной системы транспортных машин // Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении: Межд. научн.-практ. конф., Луганск, 1996.

42. Старченко В.Н., Шевченко С.И., Хухлей С.К. Автоматизированная обработка экспериментальных данных // Проблемы развития рельсового транспорта: 7-я Межд. научн.-техн. конф., Крым, Ливадия, сентябрь 1997.

43. Старченко В.Н. Трение и сцепление при взаимодействии колеса с рельсом // Проблемы механики железнодорожного транспорта: XI –я Межд. конф., ДНУЗТ им. акад. В. Лазаряна, Днепропетровск. – 2004. – С. 156.

44. Старченко В.Н. Трение и сцепление при взаимодействии колеса с рельсом в процессе торможения // Проблемы механики горно-металлургического комплекса: Межд. научн.-техн. конф., НГУ, Днепропетровск. – 2004. – С. 30.

45. Старченко В.Н., Гурин В.А. Фрикционные углерод – композиционные материалы для транспортной техники // Залізничний транспорт України, Спеціальний випуск №3/1. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Наука в транспортному вимірі». – К., 2005. – С. 256.

46. Старченко В.Н. Расчёт упругих характеристик углерод-композиционных материалов для транспортной техники // Залізничний транспорт України, Спеціальний випуск №3/1. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Наука в транспортному вимірі». – К., 2005. – С. 255.

47. Старченко В.Н. Новые фрикционные углерод-углеродные композиты для тормозных устройств подвижного состава // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: 65-я Межд. научн.-практ. конф., Днепропетровск, ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2005. – С. 77.

48. Старченко В.Н. Расчёт упругих характеристик фрикционных композитов для тормозных устройств подвижного состава // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: 65-я Межд. научн.-практ. конф., Днепропетровск, ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2005. – С. 33-34.

49. Старченко В.Н. Новые антифрикционные материалы для опорных устройств подвижного состава // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: 66-я Межд. научн.-практ. конф., Днепропетровск, ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2006. – С. 103-104.

50. Старченко В.Н. Новые фрикционные материалы для дисковых тормозов подвижного состава // Наука в транспортном измерении: Пассажирские перевозки: 2-я Межд. научн.-практ. конф., Укрзалізниця, Киев, 2006 г. – С. 32.

51. Старченко В.Н. Повышение эффективности работы опорно-возвращающих устройств подвижного состава // Наука в транспортном измерении: Пассажирские перевозки: 2-я Межд. научн.- практ. конф., Укрзалізниця, Киев, июнь 2006 г. – С. 33.

52. Старченко В.Н., Кузнецова М.Н. Фрикционные С-С композиты для тормозных устройств подвижного состава // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: 67-я Межд. научн.-практ. конф., Днепропетровск, ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2007.

53. Старченко В.Н. Новые антифрикционные материалы для опорных устройств тележек подвижного состава // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: 67-я Межд. научн.-практ. конф., Днепропетровск, ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2007.

54. Старченко В.Н., Кузнецова М.Н. Исследование теплофизических параметров фрикционных С-С композитов для тормозных устройств транспортных машин // XII –я Межд. конф., ДНУЗТ им. акад. В. Лазаряна, Днепропетровск. – 2008.

55. Старченко В.Н. Повышение эффективности торможения рельсового подвижного состава применением фрикционных С-С композитов // XII –я Межд. конф., ДНУЗТ им. акад. В. Лазаряна, Днепропетровск. – 2008.

56. Упругое зубчатое колесо: А.с. 1456672. СССР. МКИ F16H 55/14, 1/26 / Старченко В.Н., Беляев А.И., Бучный А.И. (SU) – №4264646/25-28; Заявл. 17.06.87; Опубл. 07.02.89, Бюл. №5, - 8 с.

57. Тормоз: А.с. 1492850. СССР. МКИ F16D 49/20 / Старченко В.Н. (SU) – №4237166/31-27; Заявл. 11.03.87; Опубл. 07.02.89, Бюл. №5, - 6 с.

58. Тормоз: А.с. 1581925. СССР. МКИ F16D 49/20 / Старченко В.Н. (SU) –№4255264/31-27; Заявл. 01.06.87; Опубл. 30.07.90, Бюл. №28, - 6 с.

59. Самоустанавливающееся зубчатое колесо: А.с. 1698532. СССР. МКИ F16H 1/26, B61C 9/06, F16H 55/14 / Старченко В.Н., Август В.В. (SU) – 4746627/28; Заявл. 09.10.89; Опубл. 15.12.91, Бюл. №46, - 6 с.

60. Колодкове гальмо: Деклараційний патент на корисну модель. 8057. Україна. МПК B66D 5/08, F16D 65/00/ Старченко В.М., Шевченко С.І., Полупан Є.В.(UA) – № u 200500185; Заявл. 10.01.2005; Опубл. 15.07.05, Бюл. №7,-4 с.

61. Колодкове гальмо: Деклараційний патент на корисну модель. 8059. Україна. МПК B66D 5/08, F16D 65/04 / Шевченко С.І., Старченко В.М., Полупан Є.В. (UA) – № u 200500191; Заявл. 10.01.2005; Опубл. 15.07.05, Бюл. №7,-4 с.

62. Фрикційний диск: Патент на корисну модель. 17934. Україна. МПК F16D 65/12, F16D 69/02 / Старченко В.М., Шевченко С.І., Полупан Є.В. (UA) –№ u 2006 04587; Заявл. 25.04.06; Опубл. 16.10.06, Бюл. №10, - 2 с.

**АННОТАЦИЯ**

Старченко В.Н. Научные основы повышения эффективности торможения улучшением условий взаимодействия колёс с тормозными колодкам и рельсами. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, 2008.

В диссертационной работе приведены результаты теоретического обобщения и решения научно-технической проблемы повышения эффективности торможения улучшением условий взаимодействия колёс с тормозными колодками и рельсами путём развития теории и разработки научно обоснованных технических решений, обеспечивающих повышение эффективности работы тормозных и опорно-возвращающих устройств, улучшение характеристик и условий взаимодействия подвижного состава и пути.

Предложена концепция решения динамических контактных задач для системы “колесо – рельс” в двумерной и пространственной постановках с учётом осцилляции ядер интегральных уравнений и принципа предельного поглощения, характеризующего внутреннее трение. Это позволило уточнить зависимости для оценки уровня и характера распределения контактных напряжений и силы сцепления при взаимодействии подвижного состава и пути.

Приведено теоретическое решение динамической контактной задачи о вертикальных колебаниях колеса при взаимодействии с упругим рельсом на основе точной факторизации функций ядра интегрального уравнения, при этом установлены аналитические зависимости для угла сдвига фаз и модуля комплексной амплитуды колебаний колеса.

Усовершенствована пространственная математическая модель движения локомотива с учётом возмущений от воздействия неровностей поверхности катания колеса, установлены доминантные факторы и степень их влияния на уровень силового взаимодействия колеса с рельсом. Показано, что взаимодействие колёс с изношенным профилем поверхности катания с новыми или изношенными рельсами существенно увеличивает горизонтальные поперечные ускорения и перемещения, динамические горизонтальные и рамные силы (на 15…30*%*).

При движении в кривых участках пути и взаимодействии стандартных профилей колеса и рельса устойчивое влияние на уровень горизонтальных сил в системе “экипаж – путь” оказывает величина момента сопротивления повороту тележки относительно кузова, при этом отмечается рост боковых и рамных сил (до 11…27*%*). Для улучшения условий взаимодействия в системе “тормозная колодка – колесо – рельс” предложено использовать новые разработанные фрикционные материалы в системе колодочного торможения, которые обеспечивают эффективное торможение и оказывают менее разрушающее воздействие на поверхность катания колёс, а также антифрикционные материалы в опорных устройствах с низким коэффициентом трения для снижения момента сопротивления повороту тележек относительно кузова.

Разработаны теоретические основы расчёта, компонентный состав, способы изготовления и конструктивное исполнение новых тормозных С-С колодок на основе углерод - углеродных волокон с пироуглеродной матрицей и модификаторами трения, которые характеризуются высокими и стабильными эксплуатационными свойствами, а также хорошими теплофизическими показателями в широком температурном диапазоне.

Установлены закономерности влияния на фрикционные характеристики С-С колодок качественного, количественного и фракционного состава различных компонентов, а также влияние на величину и стабильность коэффициента трения давления, скорости скольжения и температуры на контактной поверхности сопряжения. Впервые установлены теплофизические характеристики и закономерности влияния различных компонентов на теплопроводность модифицированных С-С колодок.

Экспериментальными исследованиями установлено, что гибридные С-С колодки с включением сетки из медной проволоки имеют коэффициент теплопроводности в диапазоне 20…48 *Вт/(м*М*К)*, что позволяет уменьшить температурную напряжённость в контактной зоне “тормозная колодка – колесо” на 20% и более по сравнению с композиционными колодками.

Показано расчётами на математической модели пространственного движения локомотива с составом вагонов и по методике ПТР, что независимо от фрикционных условий в контакте колёс с рельсами для достижения одной и той же величины тормозного пути нажатие на С-С колодки должно быть в два раза меньше, чем для чугунных колодок. Действительный тормозной путь при равном нажатии уменьшается более чем в два раза в сравнении с чугунными и на 8…10% меньше - в сравнении с композиционными колодками.

Путём численного моделирования нестационарного теплового процесса, который сопровождает процесс колодочного торможения рельсового подвижного состава, установлено, что опытные С-С колодки имеют существенные преимущества (до 20 и более процентов) в сравнении с серийными композиционными колодками по всем термическим показателям, в том числе и по теплонапряженности поверхности катания колёс.

Разработаны для использования в опорных устройствах антифрикционные самосмазывающиеся полимерные накладки на основе капролона с наполнителями в виде минерального масла, дисульфид молибдена и чешуйчатого графита, которые характеризуются низким и стабильным коэффициентом трения, что способствует улучшению условий взаимодействия колеса и рельса за счёт снижения момента сопротивления повороту тележек относительно кузова.

Теоретические положения и разработанные математические модели, на основании которых приняты технические решения, адекватны реальным процессам в системе “тормозная колодка – колесо – рельс”, что подтверждено комплексными экспериментальными исследованиями.

Научно-практические результаты работы являются основой повышения эффективности торможения и улучшения условий взаимодействия подвижного состава и пути, а также уменьшения интенсивности изнашивания элементов системы “тормозная колодка – колесо – рельс” и повышения срока их службы.

**Ключевые слова:** взаимодействие подвижного состава и пути, контактные напряжения, моделирование, фрикционные материалы, С-С колодки, торможение, коэффициент трения, износ, тепловые процессы, температура, срок службы.

**АНОТАЦІЯ**

Старченко В.М. Наукові основи підвищення ефективності гальмування поліпшенням умов взаємодії коліс з гальмівними колодками і рейками. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.22.07 – Рухомий склад залізниць і тяга поїздів, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Луганськ, 2008.

У дисертаційній роботі наведено результати теоретичного узагальнення і вирішення науково-технічної проблеми підвищення ефективності гальмування поліпшенням умов взаємодії коліс з гальмівними колодками і рейками завдяки розвитку теорії і використання нових науково обґрунтованих технічних рішень, що забезпечують підвищення ефективності роботи гальмівних та опорно-повертальних пристроїв, зниження інтенсивності зношування елементів системи «гальмівна колодка-колесо-рейка» і підвищення терміну служби.

Запропоновано концепцію і методи вирішення динамічних контактних задач для системи “колесо – рейка” в двовимірній і просторовій постановках з урахуванням осциляції ядер інтегральних рівнянь і принципу граничного поглинання, який характеризує внутрішнє тертя, що дозволило уточнити залежності для оцінки рівня і характеру розподілу контактного напруження, а також величини сили зчеплення при взаємодії рухомого складу і колії.

Розроблено нові гальмівні С-С колодки на основі вуглець - вуглецевих волокон з піровуглецевою матрицею і модифікаторами тертя для гальмівних пристроїв рухомого складу, а також антифрикційні самозмащувальні матеріали на основі капролону з наповнювачами у виді мінерального масла, дисульфіду молібдену і лускатого графіту для опорних пристроїв, котрі сприяють поліпшенню умов взаємодії в системі “гальмівна колодка-колесо-рейка”.

Шляхом чисельного моделювання нестаціонарного теплового процесу, що супроводжує процес колодкового гальмування рейкового рухомого складу, встановлено, що дослідні С-С колодки мають істотні переваги (до 20 і більше відсотків) у порівнянні із серійними композиційними колодками з усіх термічних показників, зокрема, щодо теплонапруженості поверхні тертя.

Теоретичні положення і розроблені математичні моделі, на підставі яких створено технічні рішення, адекватні реальним процесам в системі “гальмівна колодка – колесо – рейка”, що підтверджено комплексними експериментальними дослідженнями.

**Ключові слова:** взаємодія рухомого складу і колії, контактне напруження, моделювання, фрикційні матеріали, С-С колодки, гальмування, коефіцієнт тертя, зношення, температура, теплові процеси, термін служби.

**THE SUMMARY**

Starchenko V.N. Scientific bases of increase of efficiency of braking by improvement of conditions of interaction of wheels with brake block and rails. – Manuscript.

The dissertation on competition for the degree Doctor of technical Sciences on the speciality 05.22.07 – the rolling stock of railways and traction of trains. East – Ukrainian National University named after V. Dal, Lugansk, 2008.

In dissertational work results of theoretical generalization and the decision of a scientific and technical problem of development of the theory and improvement of conditions of interaction of system brake block – a wheel – a rail are resulted by use of the new scientifically-grounded technical decisions providing increase of an overall performance of brake devices, decrease of intensity of wear process of elements of system and increase of term of their service.

The concept of the decision of dynamic contact problems about interaction of a wheel and a rail with the account oscillation nucleus of the integrated equations and a principle of the limiting absorption describing internal friction that has allowed to specify contact pressure and forces of coupling at spatial modeling movement of the locomotive is offered, and also to establish possible ways of perfection bogie crews.

Perfection of crews by use of frictional materials on basis C-C composites in brake systems and antifrictional self-lubricated materials on a basis caprolon in basic devices, is a basis of the decision of a problem of improvement of conditions of interaction in system “brake block – a wheel – a rail”, increases of efficiency of braking, reduction of intensity of wear process of elements of system and increase of term of their service. Theoretical positions and the developed mathematical models on the basis of which technical decisions are accepted, are completely adequate to real processes in system brake block – a wheel – a rail that is confirmed with complex experimental researches.

**Keywords:** interaction of a rolling stock and way, contact pressure, modeling, frictional materials, C-C composites, braking, deterioration, thermal processes, temperature, service life.