

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

**КУРГАН ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ**



УДК 625.1.033:[539.3+536.722]

**МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ  
ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ШВИДКІСНИМ РУХОМИМ СКЛАДОМ**

**Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія  
27 – транспорт**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Дніпро – 2017**

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор  
**БОСОВ Аркадій Аркадійович,**  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор кафедри прикладної математики, м. Дніпро

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**ДАРЕНСЬКИЙ Олександр Миколайович,**  
Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри «Колія і колійне господарство», м. Харків;

доктор технічних наук, професор  
**КОСАРЧУК Валерій Володимирович,**  
Державний економіко-технологічний університет транспорту, завідувач кафедри теоретичної й прикладної механіки, м. Київ;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**ВЕРБИЦЬКИЙ Володимир Григорович,**  
Запорізька державна інженерна академія, завідувач кафедри «Програмне забезпечення автоматизованих систем», м. Запоріжжя.

Захист відбудеться «2» листопада 2017 р. о 14<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: ауд. 314, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна або на сайті за адресою: <http://ndch.diit.edu.ua/ua/sections/newzashchityd08-820-01/>

Автореферат розіслано «\_\_\_» вересня 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
д-р техн. наук, професор



А. М. Муха

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Інтеграція України до Європейського Союзу поміж інших заходів передбачає інтенсивний розвиток сфери транспортних послуг, які б відповідали сучасним європейським вимогам. Одним з пріоритетних напрямків розвитку залізничного транспорту України є підвищення швидкості руху пасажирських поїздів та подальше впровадження швидкісного, а в середньостроковій перспективі й високошвидкісного руху як у межах України, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи.

Проблема впровадження в Україні швидкісного й високошвидкісного руху надзвичайно складна – відсутній рухомий склад, полігон для дослідницьких випробувань, а забезпечення високих швидкостей руху поїздів повинно ґрунтуватися на відповідній вітчизняній нормативній базі, яка тільки починає створюватись. Більшість існуючих методик базується на підходах, доцільних тільки для прискореного руху (до 160 км/год). Тому потребує вирішення галузева проблема – створення методології (системи методів, засобів і стратегій) визначення напружено-деформованого стану залізничної колії для умов швидкісного (161–200 км/год на існуючій трасі) і високошвидкісного (201–250 км/год на існуючій та більше 250 км/год на новій трасі) руху поїздів.

Верхня будова залізничної колії, різні споруди на ній і біля неї становлять комплексну систему елементів, що працюють спільно. Зміна стану одного елемента системи тягне за собою зміну стану й умов роботи всієї верхньої будови колії та прилеглого земляного полотна. Тому одним з основних напрямків дослідження є вивчення взаємного впливу елементів системи при динамічному навантаженні та встановлення впливу швидкісного рухомого складу на систему в цілому.

Використання існуючих аналітичних методів для вирішення подібних завдань у загальній постановці практично неможливе через складність елементів системи – верхньої і нижньої будови колії. Для вивчення дії рухомих навантажень на пружні середовища, що особливо актуально для руху швидкісних і високошвидкісних поїздів, необхідна сучасна методологія наукових досліджень. При цьому проблема взаємодії колії та рухомого складу фізично є тривимірною задачею, яка повинна розв'язуватись тільки в просторовій постановці. Саме вирішенню цих проблемних завдань присвячена наукова робота.

**Зв'язок роботи дисертанта з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2020 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. № 2174-р.; Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони; Програми оновлення рухомого складу ПАТ «Укрзалізниця» на період до 2021 року.

Тема дисертації відповідає галузевій програмі модернізації колійного господарства залізниць України й узгодженій Програмі робіт ОСЗ щодо організації швидкісного руху поїздів на міжнародних транспортних коридорах.

Обраний напрямок досліджень пов'язаний також з виконанням низки науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізнично-

го транспорту імені академіка В. Лазаряна згідно з планом НДДКР ПАТ «Укрзалізниця». Основні НДР, у яких здобувач був керівником або відповідальним виконавцем:

- «Проведення досліджень та розробка нормативів щодо умов укладання безстиквої колії з рейками типу UIC60 та перспективними конструкціями проміжних скріплень» (№ ДР 0108U003893);
- «Проведення обстежень та розробка рекомендацій по ліквідації бар'єрних місць на напрямку Лозова – Гребінка» (№ ДР 0111U007617);
- «Проведення досліджень та оцінка економічної ефективності усунення обмеження швидкості за параметрами і станом залізничної колії» (№ ДР 0111U008909);
- «Перегляд Технічних вказівок по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстиквої колії на залізницях України (ЦП-0081)» (№ ДР 0111U008912);
- «Розробка інструкції з улаштування та утримання колії ТОВ «Грузинська залізниця» (№ ДР 0112U003109);
- «Розробка рекомендацій з встановлення швидкостей руху поїздів в кривих на напрямках пасажирського, суміщеного й вантажного руху» (№ ДР 0113U002080).

Здобувач брав участь в обробці та аналізі експериментальних даних при проведенні приймальних та сертифікаційних випробувань електропоїзда EJ675 («ŠKODA VAGONKA a.s.»), пасажирського поїзда Talgo (ТОО «Тулпар-Тальго»), пасажирського дизель-поїзда ДПКр-1К (ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод»).

Основні результати дослідження були отримані під час виконання бюджетної фундаментальної науково-дослідної роботи «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів в Україні» (№ ДР 0114U002549).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка методології (системи стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом, що забезпечує вирішення важливої науково-технічної проблеми – впровадження швидкісного, а в перспективі й високошвидкісного руху поїздів як в Україні, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *задачі*:

1. Виконати аналіз технічного стану колійної інфраструктури та наявності наукового забезпечення для впровадження швидкісного руху поїздів.
2. Розробити рекомендації щодо удосконалення існуючих аналітичних методів розрахунку напружено-деформованого стану залізничної колії з обґрунтуванням меж їх застосування.
3. Розробити математичну модель взаємодії колії та рухомого складу, яка дозволить визначати напружено-деформований стан залізничної колії з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечить можливість виконання розрахунків для умов швидкісного й високошвидкісного руху поїздів.

4. Проаналізувати особливості впливу сучасного пасажирського рухомого складу на напружено-деформований стан залізничної колії за результатами комплексу теоретичних і експериментальних досліджень.

5. Визначити технічні параметри конструкції колії та умови її експлуатації, за яких можливе виникнення динамічних процесів взаємодії, що виходять за межі застосування квазістатичних методів розрахунків.

6. Встановити узагальнені закономірності та залежності для врахування динамічного прогину підрейкової основи в сучасних моделях взаємодії залізничної колії з рухомим складом.

7. Розробити метод оцінки впливу швидкісного пасажирського руху в сучасних умовах на життєвий цикл експлуатації ділянки.

**Об'єкт дослідження** – процес взаємодії залізничної колії з швидкісним рухомим складом.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан залізничної колії.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач у роботі використано: *методи та положення динамічної задачі теорії пружності* – для розробки математичної моделі залізничної колії з властивостями, які відповідають поставленим задачам; *принципи моделювання на основі механіки твердого тіла* – для вирішення задач введення залізничної колії в моделі рухомого складу; *теорія поширення хвиль* – для врахування просторово-часових характеристик обрису підрейкової основи, що бере участь у взаємодії, як однієї з властивостей моделі залізничної колії; *диференціальне числення* – для створення й реалізації математичного апарату моделі; *теорія надійності* – для моделювання життєвого циклу експлуатації ділянки; *закони та положення термодинаміки* – для визначення зв'язку між механічною роботою та життєвим циклом експлуатації через ентропію системи; *експериментальні вимірювання тензометричними датчиками* – для натурного визначення напружено-деформованого стану залізничної колії під дією поїздів; *методи та положення теорії ймовірностей і математичної статистики* – для обробки, аналізу й узагальнення результатів експериментальних досліджень; *методи об'єктно орієнтованого програмування* – для практичної реалізації математичної моделі залізничної колії. Теоретичні розрахунки, експериментальні вимірювання і статистична обробка даних виконані з використанням прикладного програмного забезпечення, у тому числі й спеціального призначення, розробленого як за участю автора (виконання й обробка експериментальних вимірювань), так і особисто автором (реалізація математичної моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності).

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Основні наукові положення, висновки й рекомендації, які отримані в дисертації, обґрунтовані та достовірні, оскільки експериментальні дослідження коректно поставлені та кваліфіковано виконані за участю Колієвипробувальної галузевої науково-дослідної лабораторії ДНУЗТ, яка має акредитацію на технічну компетентність і незалежність у Національному агентстві з акредитації України (атестат № 2Н1100), дослідні результати одержано на основі достатньо великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами матема-

тичної статистики, а розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує загальноприйнятих значень.

**Основні наукові положення:**

1. Динамічний прогин рейки характеризується не тільки розміром, а й швидкістю поширення, обидві ці характеристики обернено залежать від жорсткості шарів підрейкової основи, деформації яких відбуваються зі швидкістю й обрисом руху просторових хвиль у речовині.

2. Для сучасних пасажирських поїздів (таких як Інтерсіті й Інтерсіті+) інтенсивність зміни вертикальної сили дії колеса на рейку не має вираженої залежності від швидкості руху, при цьому основним фактором збільшення цієї сили відносно статичного навантаження є динамічні нерівності колії.

3. Коефіцієнти жорсткості й дисипації залізничної колії як опори, приведені до взаємодії з колесом у моделях руху екіпажів, визначаються не тільки пружністю шарів підрейкової основи, а й мають пряму і обернену залежності від швидкості руху відповідно.

4. Життєвий цикл роботи залізничної колії як системи підпорядковується закону ентропії, а поява й накопичення залишкових деформацій – імовірнісний процес, який визначається флуктуаціями напружень і швидкістю пружних деформацій.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

*Вперше:*

1) враховано динамічний обрис простору залізничної колії, що взаємодіє з рухомим складом. За такими принципами розроблено просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, яка дозволяє визначати напружено-деформований стан залізничної колії при взаємодії з рухомим складом з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечує можливість виконання розрахунків для умов швидкісного й високошвидкісного руху поїздів;

2) отримано обґрунтовані значення швидкості руху для різних конструкцій і умов експлуатації колії, за яких не встигає реалізовуватися повний прогин рейки, що встановлює межі адекватного використання квазістатичних методів розрахунків, які раніше не визначалися;

3) отримано математичні залежності, які дають змогу аналітично визначити обрис області простору підрейкової основи, що бере участь у взаємодії на задану часову відмітку розрахунку. Раніше такі задачі мали розв'язок тільки для квазістатичних розрахункових схем. Вони можуть бути використані для вирішення питань встановлення підсилюючих шарів, захисних споруд, обґрунтування розмірів розрахункового простору під час моделювання залізничної колії методами скінченних елементів тощо;

4) розроблено аналітичні методи оцінки життєвого циклу ділянок залізничної колії на основі ентропії системи. Використання ентропії дало змогу представити старіння залізничної колії в міжремонтний період як імовірнісний процес накопичення деформацій у результаті реакції на зовнішнє навантаження, виражене через показники механічної роботи. Такий підхід, на відміну від існуючих, дає змогу визначати строки експлуатації залізничної колії не тільки за пропущеним тонна-

жем, а й враховуючи структуру поїздопотоків, у тому числі вплив швидкісного й високошвидкісного пасажирського руху.

*Вдосконалено:*

5) методику аналітичних розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії для врахування нерівнопружності підрейкової основи. Запропоновані аналітичні вирази та коригуючі коефіцієнти дозволяють, на відміну від існуючих методик, врахувати як локальні зміни модуля пружності підрейкової основи, так і сполучення ділянок конструктивно різної жорсткості під час виконання розрахунків залізничної колії на міцність;

*Розширено:*

6) закономірності впливу сучасних пасажирських поїздів на напружено-деформований стан залізничної колії, що ґрунтуються як на теоретичних, так і на експериментальних дослідженнях. Отримані результати розширюють існуючі уявлення щодо законів розподілу динамічного навантаження на колію і дають змогу обґрунтувати вибір розрахункових сил під час виконання розрахунків для швидкостей руху поїздів 160 км/год і вище;

7) отримані теоретично обґрунтовані коефіцієнти жорсткості й дисипації залізничної колії для розрахунків динаміки рухомого складу в сучасних моделях на основі систем рівнянь, складених за принципом Лагранжа–д'Аламбера. Встановлені значення, на відміну від наведених в інших джерелах, мають обґрунтовану залежність відносно конструкції колії і швидкості руху.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що розроблена методологія (система стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом дозволяє вирішувати задачі проектування та утримання ділянок відповідно до нормативів швидкісного й високошвидкісного руху поїздів. Нові підходи, положення й результати досліджень використані під час розробки й видання таких нормативних документів Департаменту колії ПАТ «Укрзалізниця»:

- Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії (ЦП-0236);
- Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України (ЦП-0266);
- Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України (ЦП-0269).

Основні результати дослідження були використані в бюджетній фундаментальній науково-дослідній роботі «Розробка наукових основ і техніко-економічне обґрунтування етапів впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів в Україні» (№ ДР 0114U002549) та в інших науково-дослідних роботах.

Більшість теоретичних положень, викладених у дисертації, впроваджено в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна під час викладання дисциплін «Проектування залізничної колії» (ОКР «магістр»), «Математичні методи та моделі в спеціальних задачах» (ОКР «бакалавр», ОКР «магістр»).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення, розробки й результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором. У наукових

працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора такий: [5, 43] – методика врахування нерівнопружності підрейкової основи; [7] – аналіз можливості порушення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки для пасажирського рухомого складу; [9] – аналіз методик прогнозування пасажиропотоку на напрямках будівництва ВШМ; [10, 21, 37-39] – створення математичної моделі на основі теорії поширення пружних хвиль; [12] – теоретичні основи моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії при високошвидкісному русі поїздів; [13, 14, 15, 27, 30, 32, 36] – визначення критеріїв оцінки взаємодії колії і рухомого складу в кривих; [16] – розробка математичної моделі процесу експлуатації залізничної ділянки; [17] – створення методики й виконання розрахунків щодо визначення життєвого циклу колії за показником механічної роботи; [18] – частина методики визначення витрат енергоресурсів за механічною роботою локомотива, яка стосується силової взаємодії у вертикальній площині колії; [19, 34] – реалізація методики розв’язання оптимізаційних задач з використанням теорії графів; [20, 25, 35] – створення методики й виконання розрахунків щодо визначення модуля пружності підрейкової основи за результатами натурних вимірювань напружень у рейках; [22] – реалізація методики розв’язання оптимізаційних задач з використанням теорії множин; [23, 26, 28] – доповнення до методики визначення допустимих швидкостей руху в кривих для врахування складних випадків; [24, 36] – порівняльний аналіз існуючих методів визначення напружено-деформованого стану залізничної колії із запропонованою моделлю на основі теорії поширення пружних хвиль; [29, 33] – визначення температурного режиму утримання залізничної колії з рейками типу UIC60; [31] – теоретичне обґрунтування врахування в розрахунках стійкості безстикової колії параметрів плану без використання апроксимації.

Роботи [1-4, 6, 8, 11, 40-42, 44, 45] написані автором особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертації доповідались, обговорювались і отримали схвалення на таких заходах:

69-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2009); 70-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2011); 71-ша Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2012); VI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (Київ, 2013); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» (Дніпропетровськ, 2013); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу» (Дніпропетровськ, 2013); 74-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2014); 75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2015); 78-ма Міжнародна конференція «Транспортне будівництво та залізнична колія» (Харків, 2016); XIV Міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту» (Дніпро, 2016); 6-та науково-



практична міжнародна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2017).

Дисертація в повному обсязі доповідалася на науковому семінарі кафедри колії та колійного господарства, міжкафедральному науковому семінарі кафедр колії та колійного господарства, проектування і будівництва доріг, мостів і тунелів Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Дніпро, 2017).

**Публікації.** Основний зміст дисертації опублікований у 45 наукових працях і матеріалах конференцій: 27 основних праць, з них: 9 – статті, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus і є фаховими [1–9], 2 – статті в закордонних виданнях [10–11], 1 – монографія у співавторстві [12], 15 – статті у фахових виданнях [13–27]; і 18 додаткових, з них: 3 – нормативні документи Департаменту колії ПАТ «Укрзалізниця» [28–30], 14 – тези доповідей та матеріали конференцій [32–45].

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається із анотації українською і англійською мовами, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг становить 378 с., з них 122 рис. за текстом (3 з них розташовано на 2 окремих сторінках), 17 табл. за текстом (1 розташована на окремій сторінці), список використаних джерел із 242 найменувань подано на 29 с., 8 додатків на 85 с.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету й задачі досліджень, їх зв'язок з науковими темами та програмами. Викладено основні наукові положення й результати, що винесені на захист, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію і публікації матеріалів досліджень.

*У першому розділі роботи* проаналізовано сучасний стан наукового забезпечення та наявність умов для впровадження в Україні швидкісного, а в перспективі й високошвидкісного руху поїздів. Розглянуто наукові дослідження вчених у цій галузі. Описано варіанти відповідної колійної інфраструктури, включаючи безстикову колію з їздою на баласті та безбаластну конструкцію залізничної колії. За результатами аналізу стану питань з математичного моделювання взаємодії рейкової колії і рухомого складу обґрунтовано передумови застосування просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності. Сформульовано постановку задач дослідження.

Перші наукові розробки з підвищення швидкостей руху на існуючих залізницях були виконані в 60-70-х роках минулого століття і знайшли відображення в працях О. П. Єршкова, М. А. Чернишова, А. І. Іоаннісяна та інших вчених. Проблемою створення в Україні високошвидкісного транспорту більше 20 років займається Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (ДНУЗТ), проектні інститути Дніпродіпротранс і Київдіпротранс, Інститут технічної механіки НАН і НКА України та інші заклади.

Задачі моделювання взаємодії колії і рухомого складу є базовими для більшості напрямків сучасних наукових досліджень залізничного транспорту. Основа сучасних розрахунків колії на міцність була розроблена ще в 1954 р. колективом авторів у складі М. Ф. Веріго, В. Н. Данилова, Є. М. Бромберга, С. Н. Попова, А. Х. Ветченка. Передумови аналітичних розрахунків рейки як балки на пружній основі були закладені в роботах проф. С. П. Тимошенка. У 1986 р. вийшла праця проф. М. В. Веріго і проф. А. Я. Когана «Взаємодія колії і рухомого складу», яка вважається фундаментальною в розв'язанні задач розрахунків колії на міцність, у тому числі з використанням просторових розрахункових схем. Дослідженню питань взаємодії присвячені роботи багатьох сучасних провідних вчених. Слід відмітити підручник проф. Е. І. Даніленка «Залізнична колія», який є першим фундаментальним виданням з цієї теми в Україні. У ньому викладено основи теорії взаємодії залізничної колії з рухомим складом, висвітлено питання надійності роботи залізничної колії при її експлуатації, у тому числі з урахуванням тривалих і повторно-змінних колісних навантажень. Під керівництвом проф. Е. І. Даніленка було розроблено низку нормативних документів, у тому числі такі, як: «Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України» (ЦП-0269), «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» (ЦП-0117) та ін.

Проф. С. В. Мямлін досліджував питання моделювання динаміки рухомого складу при взаємодії із залізничною колією. Динамічні процеси руху поїздів залізничною колією досліджено в роботах проф. В. Ф. Ушкалова, проф. М. О. Радченка та ін. Питанням напружено-деформованого стану земляного полотна присвячена низка робіт проф. В. Д. Петренка, д.т.н. О. Л. Тютькіна та ін. Задачі взаємодії колії і рухомого складу в особливих умовах експлуатації вирішувалися в монографії та інших працях проф. О. М. Даренського. Розробкою сучасних методів зміцнення й підвищення зносостійкості пар тертя займається проф. В. В. Косарчук. Вплив поверхні кочення на коливання та стійкість динамічної системи «колесо–рейка» досліджує проф. В. Г. Вербицький.

Для вирішення поставлених завдань автором також використані дослідження таких закордонних і вітчизняних вчених, як D. Connolly, M. Forde, Sz. Fischer, F. Horvat, G. Kouroussis, V. Krylov, B. Lichtberger, Є. П. Блохін, А. А. Босов, В. Д. Данович, Є. Вінклер, О. П. Єршков, Г. Кольський, І. П. Корженевич, М. Б. Курган, В. В. Лазарян, Л. Д. Ландау, О. М. Патласов, В. О. Певзнер, В. В. Рибкін, Г. М. Шахунянц та інших.

У роботі надається огляд дисертаційних робіт за спеціальністю «Залізнична колія», які виконувалися в Україні за останнє десятиріччя, що дало змогу оцінити сучасний стан питань з математичного моделювання взаємодії рейкової колії і рухомого складу. Залежно від задачі, що розв'язується, можуть використовуватися як відносно прості, у тому числі плоскі, розрахункові схеми, так і розвинені просторові моделі, які описуються системами з десятків рівнянь. Незважаючи на те що завжди йдеться про процес взаємодії колії і рухомого складу, все ж таки задачі, спрямовані на дослідження рухомого складу і на дослідження залізничної колії, мають принципові відмінності. Моделі рухомого складу – це здебільшого системи руху (коливань) пов'язаних між собою твердих тіл. Як правило, для математичного опису таких моделей використовують системи диференціальних рівнянь, скла-

дених за принципом Лагранжа–д’Аламбера. Роботу залізничної колії більш природно описувати не через переміщення тіл, а через їх деформації. Тому для математичного опису залізничної колії доцільно застосовувати моделі, що базуються безпосередньо на теорії пружності.

Забезпечення високих значень швидкості руху поїздів повинно ґрунтуватися на наявності відповідних методико-розрахункових та нормативних документів. Українські вчені створили достатню практично-теоретичну базу для розв’язання таких задач, але більшість існуючих методик базуються на підходах, доцільних тільки до певного рівня швидкості. Тому виникла потреба в створенні методології (системи методів, засобів і стратегій) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом.

Як інструмент для вирішення таких задач розглядається модель, основу якої складає динамічна теорія пружності, що дозволяє описувати динамічну рівновагу деформацій шарів залізничної колії. Враховуючи обов’язковість урахування перебігу процесу в часі, для кожного часового кроку інтегрування визначається обрис фронту поширення деформацій. Для тіл у твердому стані фронт поширення деформацій описується рівняннями поширення в матеріалі пружної просторової хвилі коливань. Таким чином, модель напружено-деформованого стану залізничної колії полягає в поєднанні рівнянь геометрії обрису частини простору системи, що залучена до взаємодії на даний момент часу, і рівнянь динамічної рівноваги її деформації.

Враховуючи те що геометрія поширення деформацій описується рівняннями руху просторової хвилі, автор в низці друкованих праць використовував терміни «хвильова модель» або «модель на основі хвильової теорії поширення напружень». З’ясувалося, що така термінологія не є вдалою, тому що в багатьох випадках розроблена модель помилково сприймається як інструмент для вивчення виключно поширення вібрацій від залізничної колії. Крім того, геометрія поширення хвиль є тільки одним з декількох задіяних положень, і така термінологія не точно відображає сутність моделі. Тому в дисертаційній роботі автором застосовується більш відповідна назва – просторова модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності.

*У другому розділі* проаналізовано гіпотези та методи сучасних розрахунків колії на міцність. За комплексом аналітичних розрахунків надано числову оцінку впливу динамічних факторів, що визначають сили взаємодії колеса і рейки у вертикальній та горизонтальній площинах. Обґрунтовано методи визначення навантаження для розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії в різних випадках. Запропоновано удосконалення розрахунків колії на міцність для нерівнопружної підрейкової основи.

За результатами розгорнутого аналізу сучасних аналітичних методів розрахунків напружено-деформованого стану колії, у тому числі практичних розрахунків залізничної колії на міцність, доведено, що математичні моделі, які протягом тривалого часу стало звично застосовувати для опису взаємодії колії і рухомого складу, з одного боку, є обґрунтованим компромісом між складністю й можливостями для певного переліку задач, але з іншого – мають певні межі застосування.

Динамічні складові сили, що діють від колеса на рейку, мають складні залежності від багатьох факторів. Виконані дослідження показали, що для більшості різновидів сучасних одиниць рухомого складу спостерігається характерна залежність внеску кожної динамічної добавки в загальне значення сили. Визначальними вихідними даними можна вважати швидкість руху і модуль пружності підрейкової основи. Встановлено, що за впливовістю різних динамічних складових можна відокремити такі швидкісні зони: до 80–100 км/год, 120–250 км/год, більше 250 км/год.

Квінтесенція методики інженерного розрахунку на міцність – диференціальне рівняння прогину рейки – визначено саме для рівнопружної основи. Тому використання математичних співвідношень, отриманих на його ґрунті, неможливе для випадків, коли модуль пружності різний у межах довжини прогину рейки. Пропонується як розрахункову схему розглядати рейку як балку, яка має суцільне навантаження з таким обрисом, залежним від модуля пружності, що дає еквівалентний прогин при вільному спиранні на дві опори (рис. 1). У цьому випадку нерівномірність модуля пружності враховується відповідною зміною обриса навантаження і, з деякими припущеннями, надає можливість отримати корективи для загальновідомих залежностей.

Для корегування практичного розрахунку введено коефіцієнт  $k_M$ , який враховує збільшення згинального моменту (а відповідно і максимально вірогідних згинальних напружень у рейці) для перерізу збігу сили з місцем найменшого модуля пружності підрейкової основи – вираз (1). Значення коефіцієнта  $k_M$  наведені в табл. 1.

$$M_{U_1 \dots U_2}^{\max} = (1 + k_M) M_{U_1}^{\max}. \quad (1)$$

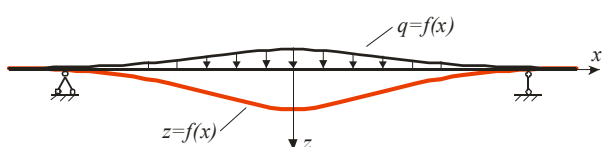


Рисунок 1 – Розрахункова схема прогину балки при спиранні на опори

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта  $k_M$  залежно від зміни модуля пружності підрейкової основи

$U_1$ , МПа	$U_2$ , МПа			
	30	40	50	60
20	0,077	0,115	0,130	0,131
30		0,044	0,063	0,067
40			0,022	0,029
50				0,008

Така зміна модуля пружності може відповідати місцю на колії із суттєвою просадкою. У такому разі зростання модуля пружності буде поширюватись в обидві сторони, і тоді значення коефіцієнта  $k_M$  повинно бути подвоєно. Якщо модуль пружності підрейкової основи в перерізі під силою достатньо великий (50 МПа та більше), подальше його збільшення по довжині рейки (у певних межах) не приводить до відчутного перерозподілу прогину рейки.

У випадку примикання конструкції колії на баласті до безбаластної (наприклад, підхід до мосту) спостерігається дуже різка зміна модуля пружності підрейкової основи. У такому разі як розрахункову пропонується використовувати схему, наведену на рис. 2, прийнявши, що з одного боку рейка спирається на опору (примикання до мосту).

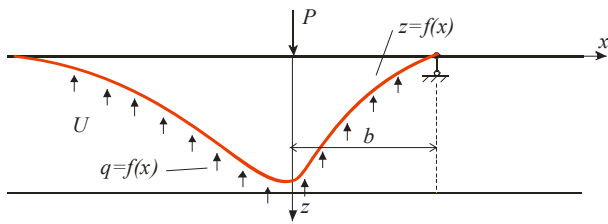


Рисунок 2 – Розрахункова схема прогину балки на ділянці підходу до моста

визначатися за формулами (2). Вони не суперечать відповідним виразам у інженерних розрахунках на міцність і можуть бути долучені до них безпосередньо.

Якщо згинальний момент (і відповідно згинальні напруження в рейці) залишаються приблизно того самого рівня, як і сила, що діє на опору (і відповідно напруження в баласті й на основній площадці земляного полотна), зростає в декілька разів. Для більшості вихідних даних найбільше зростання сили, що діє на підрейкові елементи колії, спостерігається на відстані 0,6–0,8 м від моста.

Отримані результати перерозподілу дії сил при різкій зміні модуля пружності пояснюють первопричину утворення вертикальних нерівностей перед мостом. На подальший розвиток нерівності (більш полого поширення далі від моста), окрім зазначених причин, будуть впливати динамічні ефекти дії від проходження рухомого складу по вже наявній нерівності колії.

Розглянуто особливості розрахунків залізничної колії з врахуванням взаємодії з рухомим складом у горизонтальній площині. Так, за наявності складних сполучень кривих допустима швидкість руху за відомими методиками не завжди може бути визначена однозначно. Статистика підтверджує, що велика кількість сполучень кривих на залізницях України в деяких випадках призводить до недоцільного обмеження швидкості руху або, навпаки, до її завищення і, як наслідок, до погіршення комфортабельності руху поїздів та швидкого розладу колії.

При русі колеса по рейці разом з вертикальними виникають і горизонтальні сили, які притискають колесо до рейки. Враховуючи геометричні обриси колеса й рейки, такий процес може привести до зміщення точки їх контакту на реборду колеса і до перекочування колеса через рейку. Традиційно такі процеси розглядалися для вантажних поїздів, але порушення умови може відбуватися не тільки при збільшенні горизонтальної сили, а й при зменшенні вертикальної, що властиво для «легких» пасажирських вагонів. При рівні непогашеного прискорення більше  $0,7 \text{ м/с}^2$  (що іноді може бути доцільним) значення коефіцієнта стійкості проти вко-

Прогин балки буде описуватися класичним диференціальним рівнянням четвертого ступеня, та при його розв'язку враховується наявність спирання балки на опору відповідною граничною умовою  $z(b) \rightarrow 0$ , де  $b$  – відстань від точки прикладання сили (положення колеса) до моста.

Прогин рейки, згинальний момент та сила, діюча на опору, будуть

$$\left. \begin{aligned} z(x) &= \frac{Pke^{-kx}}{U(1-tg\beta)}(-tg\beta \cos kx + \sin kx); \\ M(x) &= \frac{Pe^{-kx}}{2k(1-tg\beta)}(\cos kx + tg\beta \sin kx); \\ Q(x) &= \frac{Pkle^{-kx}}{1-tg\beta}(-tg\beta \cos kx + \sin kx); \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де  $U$  – модуль пружності підрейкової основи на баласті;  $k$  – коефіцієнт відносної жорсткості;  $\beta = kb$  – показник відстані до моста.

чування гребеня колеса на головку рейки в окремих випадках наближається до гранично допустимого значення 1,6.

У *третьому розділі роботи* розроблено просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності, яка дозволяє визначити напружено-деформований стан залізничної колії при взаємодії з рухомих складом з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що дає можливість виконання розрахунків для різних умов, у тому числі для швидкісного й високошвидкісного руху поїздів.

У розробленій моделі залізнична колія описується як набір об'єктів  $\omega_i \in \Omega$  (рис. 3). Довжина ділянки і відповідно кількість об'єктів залежить від задачі, що вирішується. Для більшості подальших розрахунків розглядалася ділянка з 15–20 шпал. Цього достатньо, щоб для перерізу, розташованого посередині ділянки, отримати повний цикл навантаження: від відсутності тиску колеса, яке розташоване ще на достатній відстані, до затухання тиску після проїзду колеса на достатню відстань.

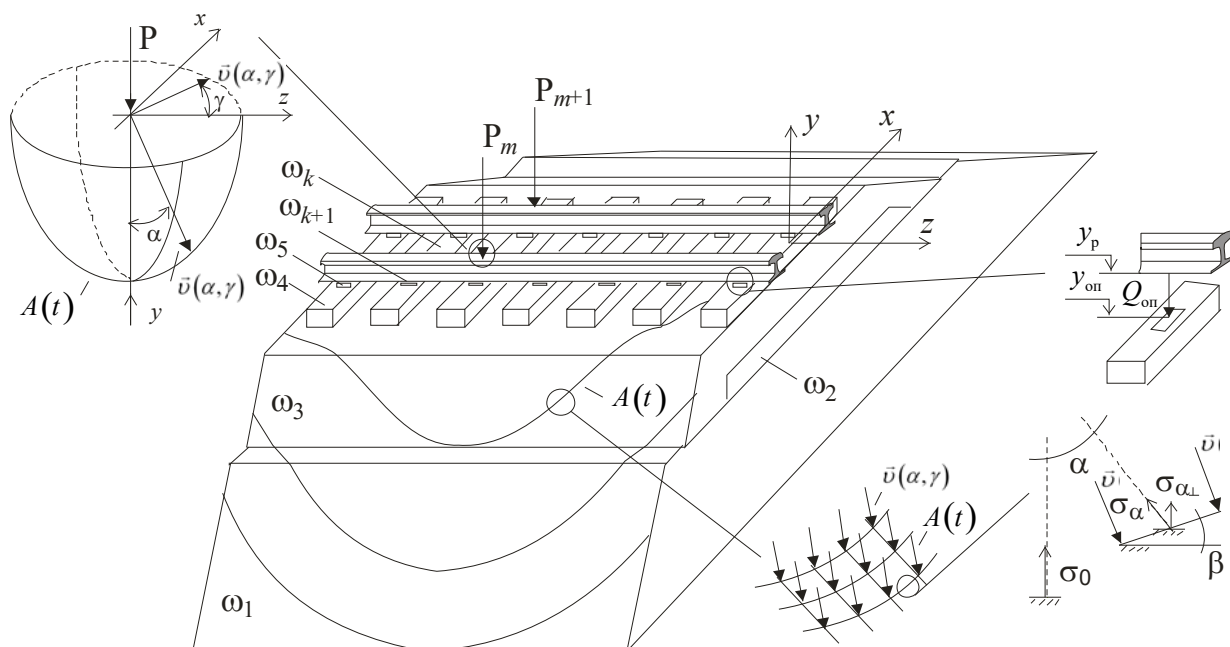


Рисунок 3 – Розрахункова схема просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності

У роботі отримано аналітичні залежності та сформульовано основні положення математичного інструменту для створення моделей напружено-деформованого стану залізничної колії за принципом поєднання рівнянь геометрії обрису частини простору системи, що залучена до взаємодії на даний момент часу, і рівнянь динамічної рівноваги її деформації. Отримано розв'язки таких задач, супутніх при реалізації математичної моделі: визначення рівнянь обрису поширення фронту взаємодії, опис розширення просторової поверхні області взаємодії через векторну множину, корегування обрису фронту поширення напружень об'єктами обмеженого (шпали, підкладки і т. ін.) та напівобмеженого (баласт, земляне полотно і т. ін.) простору, корегування фронту поширення напружень при переході з одного об'єкта в наступний з іншими фізичними властивостями, визначення рівнянь динамічної рівноваги деформованих зон простору, опис функцій ро-

зподілу напружень для відокремленої зони простору, принципи передачі тиску від одного об'єкта до наступного через поверхню контакту тощо.

Розроблену математичну модель для системи об'єктів, які утворюють залізничну колію (відповідно до рис. 3), можна надати у вигляді рівнянь (3)–(8).

Основну частину розробленої моделі складає опис напружено-деформованого стану підрейкової основи, до якої прикладаються сили, що діють на опори від прогину рейки. Ці сили визначаються в процесі моделювання як сполучення, що пов'язує прогин рейки і деформацію підрейкової основи. Зміна положення колеса по довжині рейки не приводить безпосередньо до зміни координат прикладання сил на підрейкову основу, а перерозподіляє тиск на нерухомі опори; з часом руху коліс у системі будуть «додаватися» нові навантажені опори й відповідно «вилучатися» розвантажені. Коливання рейки визначаються із умови взаємного прогину рейки ( $y_p$ ), яка спирається на опори, і прогину підрейкової основи в місцях опор ( $y_{он}$ ) від сил, що передаються на ці опори від рейки ( $Q_{он}$ ) – вираз (4).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \sigma_{0(1)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \nu_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = f(P_m, Q_{он}) - \sigma_{0(1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D_k \frac{d\sigma_{0(1)}}{dt}; \\ \frac{d^2 \sigma_{0(2)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \nu_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = \sigma_{0(1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) - \sigma_{0(2)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D_k \frac{d\sigma_{0(2)}}{dt}; \\ \dots \\ \frac{d^2 \sigma_{0(i)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \nu_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = \sigma_{0(i-1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) - \sigma_{0(i)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D_k \frac{d\sigma_{0(i)}}{dt}; \\ \dots \\ \frac{d^2 \sigma_{0(n)}}{dt^2} \sum_{\alpha} \frac{m_{\alpha} \xi_{\alpha} \nu_{\alpha} \cos^4 \alpha}{E_{\alpha}} = \sigma_{0(n-1)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) - \sigma_{0(n)} \sum_{\alpha} \sum_{\gamma} S_{\beta} \xi_{\alpha} \cos^2(\alpha - \beta) + D_k \frac{d\sigma_{0(n)}}{dt}. \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} y_p(z, t) = y_{он}(z, t); \\ y_{он} = f(Q_{он}, \sigma_{\alpha, \gamma} : (\alpha, \gamma) \equiv z); \\ Q_{он} \sim \frac{d^4 y_p}{dz^4}. \end{array} \right\} (4) \quad \left. \begin{array}{l} A(t) = \{\forall \bar{v} \in \omega_k\}; \\ \bar{v} = \Delta t C_{\alpha}; \\ C_{\alpha} = \frac{C_i C_l}{\sqrt{C_i^2 \cos^2 \alpha + C_l^2 \sin^2 \alpha}}; \\ C_l = \frac{E(1-\mu)}{\sqrt{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}; \\ C_i = \frac{E}{\sqrt{2\rho(1+\mu)}}. \end{array} \right\} (5) \quad \left. \begin{array}{l} B_i = A(t) \setminus A(t - \Delta t); \\ S_{i-1} = B_i \cap B_{i-1}; \\ m_i = \rho_i B_i. \end{array} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\alpha(\perp)} = \sigma_0 \xi \cos^3 \alpha; \\ \xi = \frac{\varphi^2 - \varphi^2 \sin^2 \alpha + \sin^2 \alpha}{\varphi^2}; \\ \varphi = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}. \end{array} \right\} (7) \quad \left. \begin{array}{l} \alpha \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]; \\ \gamma \in [0; 2\pi]; \\ \beta = f(\bar{v}); \\ n = \frac{t}{\Delta t}; \\ \Omega = \{\omega_k\}. \end{array} \right\} (8)$$

В об'єктах підрейкової основи виникають напруження, фронт поширення яких змінюється в часі ( $A(t)$ ). Зона дії напружень обмежується поверхнею, що



описується множиною векторів ( $\{\vec{v}\}$ ), положення яких визначає швидкість поширення в довільному напрямку ( $C_\alpha$ ), яка залежить від поперечної ( $C_t$ ) та поздовжньої ( $C_l$ ) швидкості руху хвиль у речовині з модулем пружності Юнга ( $E$ ), коефіцієнтом Пуассона ( $\mu$ ) і щільністю ( $\rho$ ) – вираз (5). З кожним часовим кроком ( $\Delta t$ ) зона дії напружень збільшується, поділяючи підрейкову основу на умовні сегменти ( $B_i$ ) з площею поверхні ( $S_i$ ) – вираз (6). Кожен такий сегмент поділяється на окремі елементи – простір, обмежений чотирма суміжними векторами. Сумарні дані по кожному об'єкту складають інформацію про напружений стан сегмента. Якщо при розв'язанні рівнянь (5), (6) з'ясовується, що вектор виходить за межі об'єкта (переходить до наступного), його параметри корегуються. Динамічна деформація сегмента підпорядкована системі рівнянь (3). Її розв'язок визначає напруження (деформації) будь-якої точки підрейкового простору з урахуванням дисипації речовини ( $D_k$ ), що унеможливорює виникнення надшвидких деформацій.

Адекватність розробленої моделі для вирішення поставлених завдань обґрунтовано шляхом порівняння отриманих результатів з розрахунками, виконаними за аналітичними формулами теорії пружності для перевірки окремих принципів та складових алгоритмів моделі, і за офіційною методикою «Правил розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» для моделі залізничної ділянки в цілому. Незначні розходження, які спостерігалися в окремих розрахункових випадках, пояснюються неможливістю повного ототожнення просторової динамічної моделі з плоскими квазістаціонарними методами. Порівняння результатів з експериментальними даними розглянуто в наступних розділах.

У четвертому розділі виконано експериментальну оцінку напружено-деформованого стану залізничної колії: визначено характеристики жорсткості залізничної колії за результатами експериментальних вимірів напружень у рейках; проведено статистичний аналіз залежностей вертикальних сил від швидкості руху, у тому числі з дослідженням ступеня впливу різних динамічних складових на формування діючої сили; проаналізовано напруження, що виникають у підрейковій основі від сучасних пасажирських поїздів.

Запропоновано та випробувано метод визначення модуля пружності підрейкової основи за результатами обробки напружень, виміряних у послідовності перерізів рейки, від дії рухомого складу (рис. 4). Коефіцієнт відносної жорсткості розраховувався шляхом апроксимації набору пар значень відношення напруження–

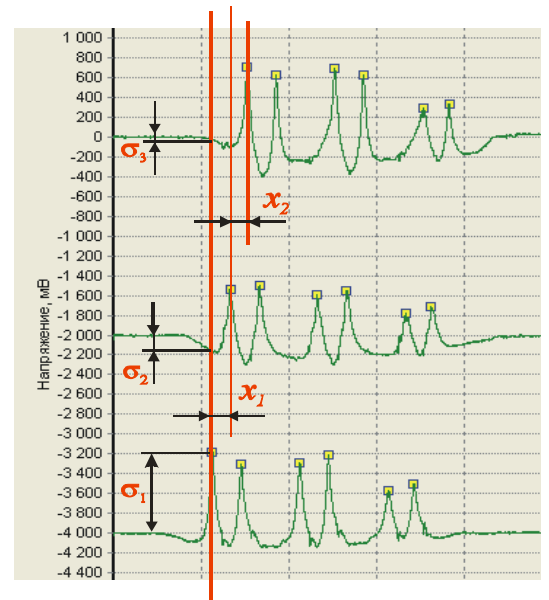


Рисунок 4 – Визначення напружень і відстаней за результатами цифрового запису



відстань за критерієм найменших квадратів. Такий підхід дає змогу не обмежуватися двома перерізами на рейці. Алгоритм розрахунку модуля пружності підрейкової – вираз (9).

$$\left. \begin{aligned} U &= 4EIk^4; \\ k &= f(\{\mu_i\}); \\ \mu_i &= e^{-kx_i} (\cos kx_i - \sin kx_i); \\ \exists k : \sum_i \left( \mu_i \sigma_0 - \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^2 &\rightarrow \min. \end{aligned} \right\} (9)$$

На прикладі визначення модуля пружності підрейкової основи на ділянках за результатами експериментальних вимірювань підтверджено, що його значення, особливо в літній період, можуть бути меншими за розрахункові, встановлені відповідно до довідкових джерел. Так, на двох дослідних ділянках, які належать до I категорії колії і не мають

відхилень в утриманні, більших за другий ступінь, були визначені модулі пружності підрейкової основи на рівні 22 і 35 МПа. Чим менший модуль пружності, тим менша швидкість поширення напружень у шарах підрейкової основи і, як наслідок, при менших значеннях швидкості руху можуть спостерігатися динамічні ефекти, які виходять за межі адекватності квазістатичних розрахунків.

За результатами експериментальних досліджень отримано характеристики статистичних законів розподілу сили, що діє від колеса на рейку, для сучасних пасажирських поїздів (на прикладі Talgo і Skoda) для значень швидкості до 200 км/год включно. Для низьких значень швидкості (до 80 км/год) розподіл значень вертикальної сили, виміряних експериментально, майже повністю збігається з теоретичним розподілом за законом Гаусса; для високих значень швидкості руху (200 км/год) експериментально отриманий закон розподілу має асиметричне відхилення на 10 % в бік зменшення діючої сили. Для локомотива спостерігається майже лінійна залежність максимальної вірогідної сили від швидкості руху, що відповідає розрахункам за чинними методиками; для сучасних пасажирських вагонів рівень вертикальної сили дії від колеса на рейку не має суттєвої інтенсивності зростання навіть для високих значень швидкості руху (рис. 5).

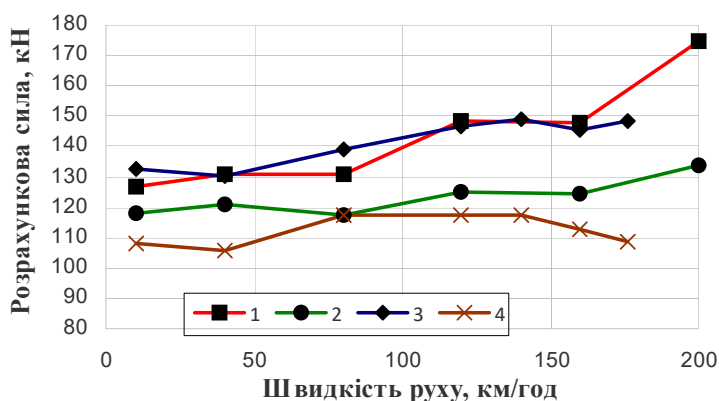


Рисунок 5 – Вертикальні сили дії колеса на рейку за експериментальними дослідженнями: 1 – локомотив KZ4A; 2 – пас. вагон Talgo; 3 – моторний вагон Skoda; 4 – безмоторний вагон Skoda

дисперсійним аналізом) на рівні 1,7; ступінь впливу роботи залізничної колії –

Масив даних, отриманих експериментально для пасажирських поїздів, має три основні варіації: швидкість руху, номер осі вагона й місце перерізу колії, у якому виконувалися вимірювання напружень у рейках. Можна вважати, що номер осі характеризує ймовірну складову коливань результатів вимірів, яка залежить від впливу рухомого складу, а номер перерізу – ймовірну складову, що залежить від залізничної колії. Для діапазону 40–200 км/год було отримано ступінь впливу рухомого складу (критерій Фішера за факторним

120,0 при рівні критичного значення коефіцієнта Фішера для розмірів розглянутих вибірок 2,03. Для різних значень швидкості руху результати оцінки впливу розглянутих факторів принципово не змінюються. Загальна кількість вимірювань у матриці спостережень коливалась для різних рівнів швидкості руху. Найменша кількість (для швидкості 200 км/год) складала 560 значень.

Результати факторного дисперсійного аналізу експериментальних даних чисельно підтверджують, що коливання кузова в сучасних пасажирських вагонах якісно гасяться й не приводять до суттєвого збільшення вертикальної сили тиску колеса на рейку. Основним фактором збурення динамічної сили можна вважати проходження колесом динамічної нерівності колії, яка утворюється внаслідок коливань рейки на пружній підрейковій основі навіть за відсутності суттєвих геометричних нерівностей.

На прикладі сучасних пасажирських поїздів отримано експериментальні значення напружень у товщі підрейкової основи. Месдозни встановлювалися на різній глибині баласту відносно подошви шпали в перерізах під шпалою і між шпалами по осі головки рейки. Середні значення напружень у щебені (рис. 6) корегують із середніми значеннями сили, що діє від колеса на рейку. Підтверджено адекватність розробленої просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії для визначення напружень у підрейковій основі шляхом порівняння з експериментальними даними, отриманими для пасажирського поїзда.

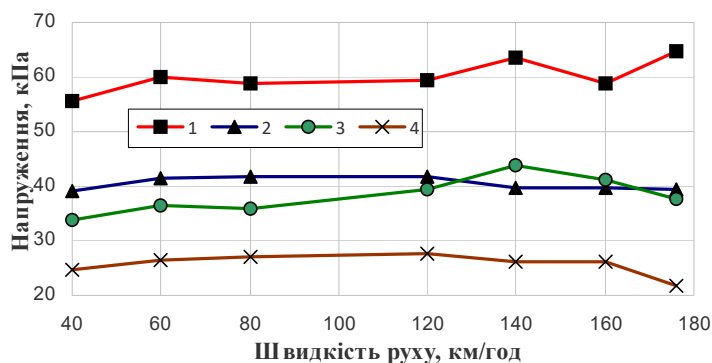


Рисунок 6 – Середні виміряні напруження в баласті: 1, 3 – 20 см від подошви шпали; 2, 4 – 40 см; 1, 2 – моторний вагон Skoda; 3, 4 – безмоторний вагон Skoda

таких вихідних даних: рейки типу Р65, залізобетонні шпали, баласт щебеневий 0,5 м з модулем деформації 200 МПа, ґрунт з модулем деформації 25 МПа (загальний модуль деформації підрейкової основи 40 МПа); момент перебування сили 118 кН в точці, що збігається з віссю шпали по середині змодельованої ділянки.

На рис. 8 показано результати моделювання зміни обрису фронту взаємодії в залізничній колії (наведено приклад для ґрунту з модулем деформації 25 МПа). Вертикальна вісь на рисунку збігається з віссю прикладання сили, остання лінія відповідає умові «повного» прогину рейки. З рухом колеса далі від вибраного перерізу фронт хвилі пружної деформації продовжує поширюватись. У випадку коли швидкість руху поїзда суттєво менша за швидкість поширення області взаємодії,

*У п'ятому розділі роботи* застосовано розроблену просторову модель динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності для розв'язання різноманітних задач напружено-деформованого стану при розрахунках залізничної колії.

Отримано розв'язки задач розподілу напружень у просторі підрейкової основи для різних варіантів конструкції колії і значень швидкості руху. На рис. 7 наведено приклад розподілу напружень для

колесо розташоване в зоні реалізованих деформацій. У разі руху поїзда по залізничній колії з достатньо великою швидкістю підрейкова основа може й не встигати реалізувати деформації по всій довжині формування прогину рейки. Межу швидкості руху, при якій встигає реалізуватися «повний» прогин, буде визначати умова

$$z(V) = z_n : A(x + Vdt) \in B(x, dt), \tag{10}$$

де  $A(x)$  – множина точок півпростору, що обмежені фронтом взаємодії, достатнім для реалізації «повного» прогину  $z_n$  у точці  $x$ ;  $B(x, t)$  – множина точок півпростору, що обмежені фронтом взаємодії після його поширення відносно  $A(x)$  за час  $t$ .

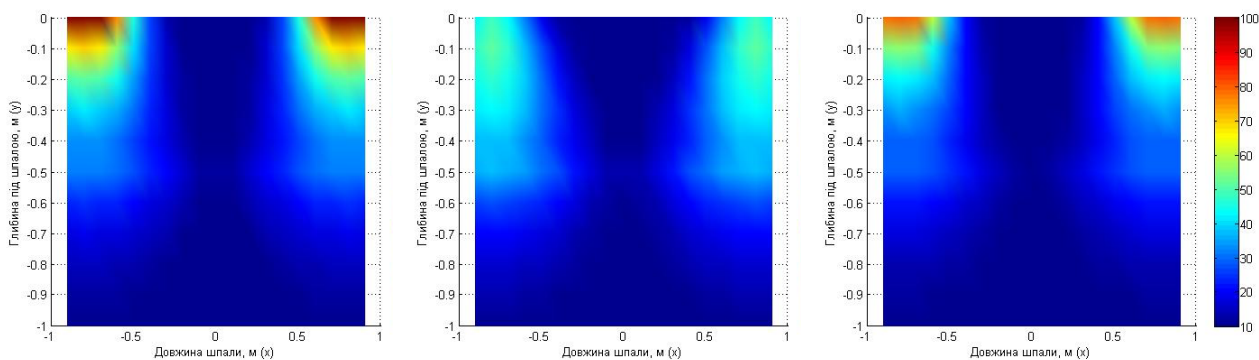


Рисунок 7 – Розподіл напружень по глибині: а – для перерізу, де розташоване колесо; б – між шпалами; в – під шпалою, суміжною щодо розташування колеса. Нульові відмітки відповідають осі колії і підшві шпали для горизонтальної і вертикальної осі відповідно

Приклад розрахунку за виразом (10) для умовно великого значення  $dt$  показано на рис. 9. Так, при швидкості руху  $V_1$  (лінія 2) прогин встигає сформуватися повністю, а при швидкості  $V_2$  (лінія 4) вже не встигає. Деякі результати варіантних розрахунків наведено в табл. 2.

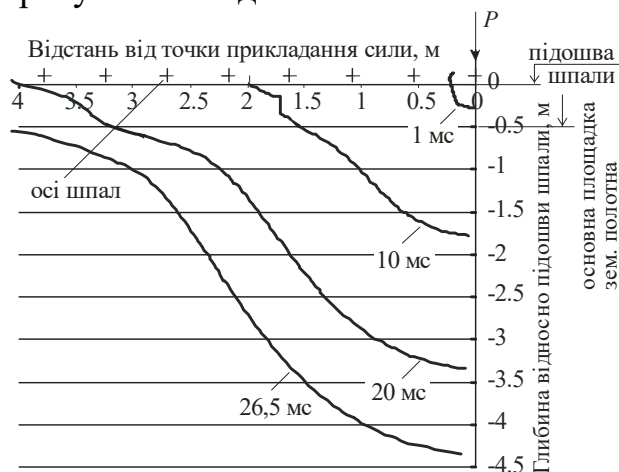


Рисунок 8 – Зміна обрису фронту поширення в підрейковому просторі

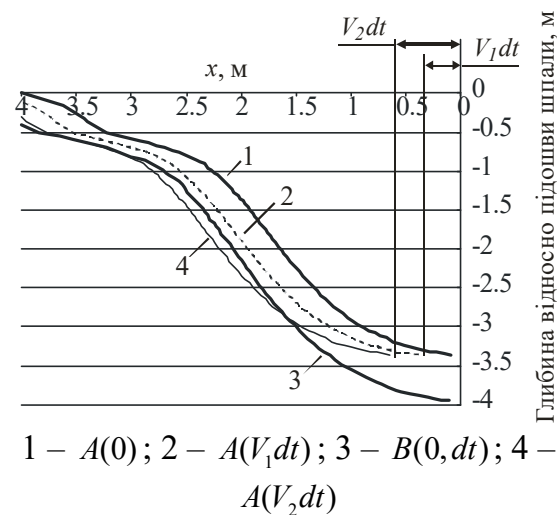


Рисунок 9 – Обриси фронтів поширення

Навіть у разі ґрунтів з невеликими модулями деформації (7–10 МПа) значення швидкості руху для появи ефекту нереалізації повного прогину рейки складають 215–250 км/год відповідно. На рівень цієї швидкості, окрім характеристик ґрунту (хоча вони і є визначальними), впливають також властивості шарів над

грунтом. Якщо земляне полотно складається з ґрунтів, які мають модуль деформації, достатній для забезпечення загального модуля пружності підрейкової основи

Таблиця 2 – Значення швидкості руху, при яких не встигає реалізуватися повний прогин

Модуль деформації, МПа		Модуль пружності підрейкової основи ( $U$ ), МПа	Швидкість руху, км/год
баласту ( $E_6$ )	ґрунту ( $E_{гр}$ )		
100	7	11	215
	10	15	250
	15	21	315
	20	26	360
	25	32	395
200	30	40	405
	30	44	440
	40	57	485
	50	64	530

на рівні 40–50 МПа і більше (що закладається в більшості розрахунків колії на міцність), досліджені ефекти можуть з'явитися при доволі великих рівнях швидкості руху – 350–400 км/год і вище.

Встановлено обриси динамічного прогину рейки залежно від пружних характеристик колії і швидкості руху та відповідні геометричні розміри мінімального фронту поширення деформацій у підрейковій основі, які повинні відбуватися для реалізації повного прогину рейки. На рис. 10 наведено приклади для такої конструкції колії: ділянка з 17 залізобетонних шпал, баласт щебеневий (модуль деформації 200 МПа) товщиною 0,5 м від подошви шпали, ґрунт з модулем де-

формації 25 МПа (що відповідає загальному модулю пружності підрейкової основи 32 МПа), навантаження 145,5 кН рухається із заданою швидкістю.

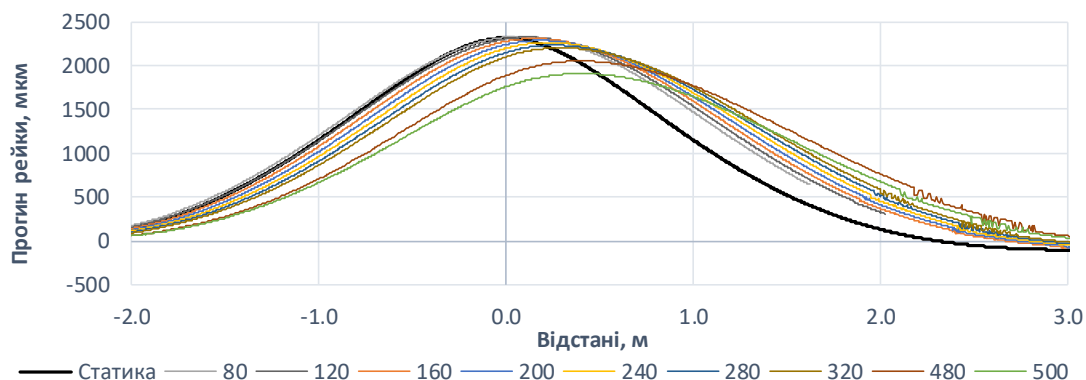


Рисунок 10 – Прогини рейки для різних значень швидкості руху (приклад для  $U=32$  МПа)

Зі збільшенням швидкості руху спостерігається зміна обрису прогину рейки, що є наслідком прояву дисипативних властивостей шарів підрейкової основи. Але ці зміни невеликі й такі характеристики, як максимальне значення прогину і його довжина, залишаються майже постійними. Тому напруження, які виникають у підрейковій основі під час цього процесу, можуть відрізнятися швидкістю реалізації, але за максимальними значеннями тотожні статичним. Усе це підтверджує, що значення осьових максимальних напружень, які ґрунтуються на тотожності характеристик динамічного і статичного прогинів, не будуть суттєво відрізнятися при застосуванні квазістатичних методів розрахунків. Додатково на рис. 10 показано обриси прогину рейки для швидкостей 480 і 500 км/год, при яких (див. табл. 2) уже не буде встигати реалізовуватися «повний» прогин рейки.

На рис. 11 показано динамічні прогини рейки, аналогічні прикладу, наведеному на рис. 10, у порівнянні руху одиничного колеса і двовісного візка для швидкості 320 км/год. Урахування дії другого колеса не приводить ні до відчутного збільшення максимального прогину (у перерізі під колесом), ні до появи додаткових ефектів у сенсі урахування динаміки прогину підрейкової основи. Детальніше одночасна дія декількох коліс була розглянута в другому розділі дисертації на основі існуючих аналітичних методів.

У роботі отримано математичні рівняння, які дають можливість аналітично визначати з точністю, достатньою для інженерних розрахунків, обрис області простору підрейкової основи, що бере участь у взаємодії на задану часову відмітку розрахунку:

$$r(\alpha, t) = \frac{0,62t\sqrt{E_{зп}}}{\sqrt{\rho_{зп}(1-0,71\cos^2\alpha)}} + \frac{h_6}{\cos\alpha} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_{зп}\rho_6}{E_6\rho_{зп}}} \right), \quad (11)$$

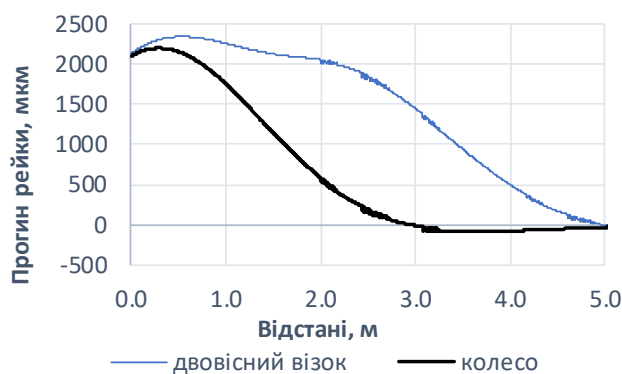


Рисунок 11 – Прогини рейки для руху одиничного колеса і двовісного візка для швидкості 320 км/год

де  $h_6$  – товщина шару баласту;  $E_6$ ,  $E_{зп}$  – модуль деформації баласту і земляного полотна відповідно;  $\rho_6$ ,  $\rho_{зп}$  – щільність речовини баласту і земляного полотна відповідно. Формула (8) наведена в спрощеному вигляді для коефіцієнта Пуассона 0,3, що відповідає більшості сипучих речовин баласту і ґрунту. У разі потреби можна відтворити результат у декартовій системі координат:  $x = r \sin \alpha$ ;  $y = r \cos \alpha$ . В отриманих формулах прийнято, що рівень  $y=0$  відповідає підшві шпали. Вони можуть бути використані для розв'язання задач встановлення під-

силюючих шарів, захисних споруд, обґрунтування розмірів розрахункового простору при моделюванні залізничної колії методами скінченних елементів тощо.

Як показали розрахунки прогинів рейки, параметри жорсткості залізничної колії залежать не тільки від характеристик шарів, з яких складається підрейкова основа, а й від швидкості руху поїзда. Отримані результати розрахунків динамічних прогинів рейки для різних варіантів вихідних даних дають змогу встановити відповідні характеристики залізничної колії для моделей рухомого складу, складених із системи рівнянь за принципом Лагранжа–д'Аламбера.

Задача полягає у визначенні таких характеристик колії, як приведена маса, коефіцієнт жорсткості, коефіцієнт дисипації. Процес сприйняття навантажень фрагментом колії, приведеної до одного колеса, розглядається як робота системи, яка має масу, жорсткий ( $k_k$ ) і дисипативний ( $\beta_k$ ) зв'язки з основою (рис. 12). Диференціальне рівняння коливань такої системи буде мати вигляд (12).



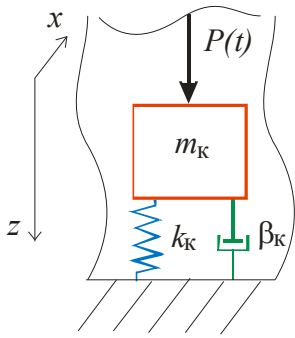


Рисунок 12 – Розрахункова схема роботи фрагмента колії, приведеної до одного колеса

$$m_k \frac{d^2 z}{dt^2} + \beta_k \frac{dz}{dt} + k_k z = P(t). \quad (12)$$

Характеристики колії визначалися за результатами обробки масиву прогинів (приклад наведено на рис. 13), отриманих у результаті моделювання ( $Z_M$ ), за алгоритмом:

$$\left. \begin{aligned} z &= f(k_k, \beta_k, m_k, P); Z_M = \{z_{M(i)} = f(P)\}; R = \sum_i (z_{M(i)} - z)^2; \\ \exists k_k \in (k_{k(\min)}; k_{k(\max)}), \exists \beta_k \in [0; \beta_{k(\max)}), \exists m_k \in [0; m_{k(\max)}): R \rightarrow \min; \\ k_k &\neq k_{k(\min)}; k_k \neq k_{k(\max)}; \beta_k \neq \beta_{k(\max)}; m_k \neq m_{k(\max)}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Визначено коефіцієнти жорсткості й дисипації залізничної колії (табл. 3) для введення її в моделі, побудовані на основі систем рівнянь, складених за принципом Лагранжа–д’Аламбера. Доведено, що застосування в таких моделях приведеної маси об’єктів колії доцільне лише для випадків, у яких не встигає відбутися повний прогин рейки.

Таблиця 3 – Характеристики залізничної колії залежно від модуля пружності підрейкової основи і швидкості руху

Модуль пружності підрейкової основи, МПа	Показник	Швидкість руху, км/год					
		80	120	160	200	240	280
21	$k_k$ , кН/м	47400	48200	49500	51200	53200	55300
	$\beta_k$ , кН·с/м	100	70	60	40	40	40
32	$k_k$ , кН/м	62600	63100	63900	65000	66200	67700
	$\beta_k$ , кН·с/м	130	80	70	60	50	50
57	$k_k$ , кН/м	97200	97900	98600	99400	100400	101800
	$\beta_k$ , кН·с/м	210	160	110	90	80	70

Розроблені принципи моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії можуть бути застосовані для розрахунків різних конструкцій верхньої будови колії, у тому числі безбаластних. Як приклад, на рис. 14 наведено резуль-

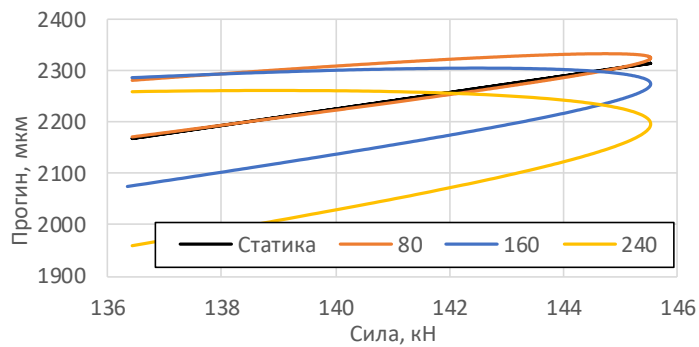


Рисунок 13 – Приклад моделювання навантаження колії (з модулем пружності підрейкової основи 32 МПа)

тати розрахунків для безбаластної колії типу Rheda 2000 у вигляді розподілу напружень під плитою в шарі ґрунту (модуль деформації ґрунту 25 МПа, розрахункова сила 118 кН). Результати показані для перерізу глибиною 40 см і шириною  $\pm 0,9$  м, де  $x=0$  – вісь колії; сили прикладалися в точках з координатами  $x=\pm 0,8$  м. Для порівняння наведено аналогічний розподіл напружень для конструкції залізничної колії на баласті (рейки типу Р65, залізобетонні шпали, баласт товщиною 0,5 м, ґрунт з модулем деформації 25 МПа).

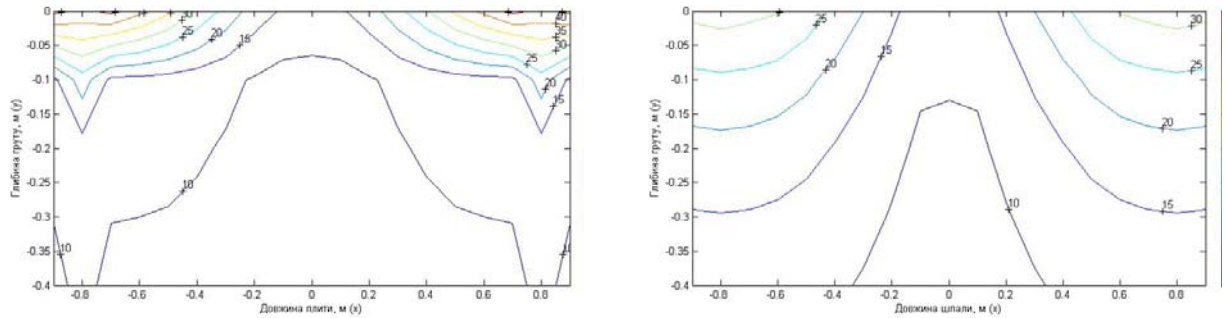


Рисунок 14 – Розподіл напружень (кПа) у ґрунті: а – під плитою безбаластної конструкції колії; б – під баластом

Встановлено, що для безбаластної конструкції характерні більші (до 2 разів порівняно з баластною колією) значення напружень на основній площадці земляного полотна. Починаючи з глибини приблизно 20 см, максимальні значення напружень у ґрунті для обох конструкцій колії не мають суттєвої різниці, але для безбаластної колії обрис розподілу навантаження є більш рівномірним.

**У шостому розділі** за результатами моделювання досліджено процеси накопичення деформацій залізничної колії. Обґрунтовано теоретичні основи та розроблено методику розрахунків накопичення деформацій на основі ентропії системи. Надано рекомендації щодо врахування дії пасажирського руху на терміни експлуатації залізничної колії.

Однією з основних причин утворення геометричних нерівностей слід вважати наявність нерівнопружності колії. Розташування вертикальної нерівності по довжині не обов'язково повторює місце положення проблемної ділянки. З часом експлуатації ділянки вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й вздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних екстремумів та появою нових. Інтенсивність зростання амплітуди нерівності в місці її початкового утворення з часом експлуатації зменшується, але процес набуває розвитку в інших місцях, що, як правило, призводить до утворення так званих «ям» на підході до нерівнопружної ділянки.

Встановлення прямої умовної залежності значення залишкових деформацій від загальних порушує адекватність моделі, особливо в умовах навантажень, які значно менші за рівні міцності (що більш характерно для пасажирського руху). У такому випадку причиною виникнення залишкових деформацій будуть не самі прогини колії, а їх нерівномірність по довжині. Була прийнята гіпотеза, що збільшення залишкових деформацій, визначених за пропущеним тоннажем ( $T$ ), для наступного кроку ітерації ( $\Delta z_{\text{зал}}(x)$ ) розподіляються по довжині ділянки ( $x$ ) пропорційно похідній динамічного прогину  $z_{\text{дин}}(x)$  – вираз (14). Запропонований підхід

дозволяє дослідити процес появи нерівності від наявності нерівнопружності колії та її подальшого розвитку в процесі експлуатації.

У певних випадках створення зони нерівнопружності колії може пов'язуватися не з відхиленнями в утриманні, а з конструктивними особливостями, наприклад, ділянка переходу від баластної колії до мосту, зона перетину залізниці й автодороги тощо. Відповідно до запропонованої методики на рис. 15 показано приклад моделювання процесу розвитку вертикальних нерівностей у зоні залізничного переїзду.

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{\text{зал}}(x) &\sim \frac{dz_{\text{дин}}(x)}{dx}; \\ \Delta z_{\text{зал}}(x) &\leq f(T); \\ \exists x, \Delta z_{\text{зал}}(x) &= f(T). \end{aligned} \right\} (14)$$

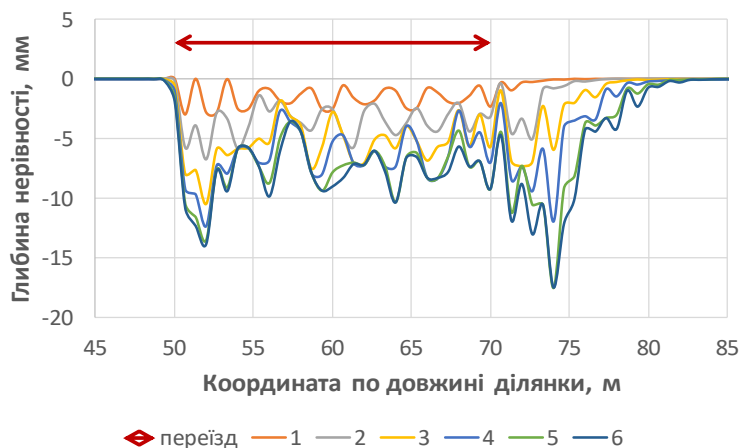


Рисунок 15 – Моделювання розвитку нерівності колії в зоні переїзду: 1–6 – послідовність ітерацій розрахунку

Як впливає з аналізу результатів розрахунків, наявність переїзду, створивши зону із збільшеним модулем пружності підрейкової основи, провокує появу нерівності колії. Максимальні амплітуди такої нерівності будуть спостерігатися на початку і в кінці утворення. З часом експлуатації ділянки нерівність буде розвиватися, і по довжині колії зокрема, що призведе до виникнення «ями» за межами розташування конструкції.

Термін служби залізничної колії залежить не тільки безпосередньо від пропущеного вантажу, а й від динамічного характеру навантаження та пружно-жорсткісних показників залізничної колії. Для моделювання процесу поступової зміни стану залізниці за час експлуатації залізнична колія представлена як система, яка складається з множини елементів з різними властивостями, зібраних у суцільну конструкцію. Кожен елемент пов'язаний з іншими, що формує навколо нього сукупність зв'язків. При навантаженні системи ця сукупність деформується, а за певних обставинах деякі зв'язки руйнуються, що зумовлює перехід від пружних деформацій до залишкових.

Якщо оперувати вірогідністю появи певних відхилень, зручно стан системи (ступінь її старіння) характеризувати кількістю умовних розривів внутрішніх зв'язків для питомої довжини. Однаковий стан системи можуть описувати різні комбінації розривів. Чим більша кількість розривів, тим більше існує варіантів змін структури системи, що відповідають її стану. Для наведеної характеристики використовується такий числовий показник, як ентропія.

Такий підхід можна порівняти з бальною оцінкою стану ділянки за показниками колієвиміральної стрічки, особливо в разі застосування сучасних методів, які враховують теорію ймовірностей. Однак, колієвимірвальна стрічка дає оцін-



ку фактичному стану залізничної колії, а запропонована методика – можливість моделювати процес зміни стану для прогнозування прямих і непрямих наслідків дії різних факторів. Тому встановлення безпосередньої тотожності між цими підходами не є доречним.

Викладено теоретичні дослідження, на основі яких створено аналітичну методику моделювання накопичення деформацій залізничної колії як процес збільшення ентропії системи. Зростання ентропії визначається як наслідок зміни енергетичних показників системи

$$\Delta S = f(dU, \delta A, \mu dN), \quad (15)$$

де  $dU$  – зміни внутрішньої енергії;  $\delta A$  – робота системи проти дії зовнішніх сил;  $\mu dN$  – зовнішнє додавання речовини в кількості  $N$  з потенціалом  $\mu$ . Для розв'язку використовуються диференціальний вигляд відповідних залежностей, це дає змогу враховувати, що  $dU$  – це повний диференціал, а  $\delta A$  – елементарна порція, за яку приймається робота системи від проходження одного колеса.

Визначення роботи сил, спрямованих на деформацію залізничної колії в цілому, є дуже широкою задачею. Для вирішення питань порівняння між собою варіантів з різними конструкціями верхньої будови колії або з різними експлуатаційними параметрами, достатньо дотримуватись одноманітності підходу та мати залежність результату саме від того параметра, який відрізняє варіанти. Тому надалі прийнято термін еквівалентної роботи залізничної колії, під якою мається на увазі робота сил, що діють від рейки на опору і виконують вертикальну деформацію підрейкової основи в перерізі колісної пари.

У загальному вигляді числовим показником системи є кількість варіантів її стану (міра неупорядкованості), але для практичних розрахунків результати надаються як вичерпання ресурсу залізничної колії на розрахунковий час, виражене у відсотках ( $\tilde{W}$ ). При отриманні остаточних формул з визначеними числовими коефіцієнтами (табл. 4) за 100 % прийнято строк, який відповідає пропуску 800 млн т брутто на ділянці, яка за вантажонапруженістю належить до I категорії. Прийнято, що протягом усього часу експлуатації стан колії відповідає встановленим нормам і не потребує обмежень швидкості руху, що досягається своєчасним виконанням робіт з поточного утримання та проміжних ремонтів. Тому, порівнюючи варіанти, які протягом однакового терміну експлуатації, встановленого за пропущеним тоннажем, мають за наведеною методикою різну оцінку, насамперед можна зробити висновок щодо різниці у витратах на поточне утримання для цих варіантів.

Така методика дає можливість порівнювати варіанти з різними параметрами поїздопотуку, різними встановленими швидкостями руху, характеристиками конструкції колії тощо. Наприклад, ділянка має таку конструкцію: рейки типу Р65, з/б шпали, щебеневий баласт товщиною 60 см; добовий потік поїздів: 30 пасажирських масою 1000 т з навантаженням 15 т/вісь, 40 вантажних масою 4000 т з навантаженням 21,5 т/вісь. Після 11,5 років експлуатації (на момент пропуску встановлених 800 млн т брутто) при швидкісних умовах 100/40 км/год (швидкість пасажирських і вантажних поїздів відповідно) система ще має 6,8 % ресурсу; при швидкісних умовах 160/80 – ресурс уже вичерпано на 13,2 %. Якщо при швидкісних

умовах експлуатації 160/80 км/год товщина баластного шару 40 см (на 20 см менше за нормативну товщину для ділянки I категорії) ресурс буде вичерпано на 15,5 %.

Використання просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії дає змогу розраховувати механічну роботу через тензори напружень і деформацій за четвертим варіантом відповідно до табл. 4.

На рис. 16 показні приклади графіків для похідної еквівалентної роботи ( $\dot{A}$ ). Місце максимального значення цього параметра, а саме він визначає інтенсивність старіння системи, спостерігається перед колесом. Коли колесо підїжджає до розрахункового перерізу, деформації вже майже реалізовані й навіть уже майже стабільні. Саме на деякій відстані перед колесом відбувається інтенсивний набір деформацій – система виконує основну частину механічної роботи. За колесом спостерігається майже симетричне послаблення напруженого стану, але інтенсивність цього процесу менша за попередній, що пояснюється проявом дисипації.

Таблиця 4 – Розрахункові формули оцінки строків накопичення деформацій залізничної колії

Варіант	Розрахункові формули		Фактори, що враховано
	вичерпання ресурсу залізничної колії $\tilde{W}$ , %	робота колії від проходження колісної пари $A$ , кН·м	
1	$\tilde{W} = 100 \left( e^{0,066 \sum n_k (0,116 + A_k)} - 1 \right)$ $n_k = \frac{365 \cdot 10^{-6} N_k Q_k T_p}{q_k}$	$A = 3,6 \cdot 10^{-4} q^2$	Осьове навантаження
2		$A = 2Qz$	Структура потоку поїздів
3		$A = (0,67\sigma_{ш} + 4,96\sigma_6 + 45,7\sigma_{3ш}) \times Q \cdot 10^{-3}$	Структура потоку поїздів, конструкційний склад колії
4	$\tilde{W} = 100 \left( e^{0,066 \sum n_k \int_0^t (0,116 + \dot{A}_k) dt} - 1 \right)$	$\dot{A} = \sum \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$	Детальне врахування конструкції колії, високі швидкості руху

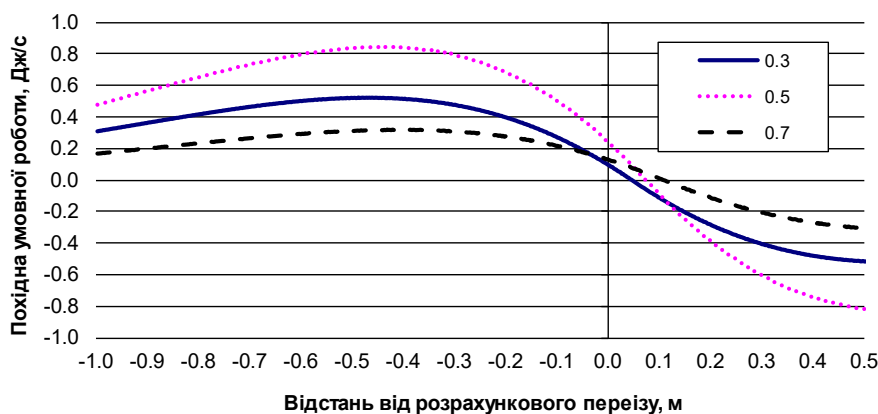


Рисунок 16 – Зміна похідної еквівалентної роботи для підрейкової основи на різній глибині (0,3; 0,5 і 0,7 м від підшви шпали) залежно від положення колеса відносно розрахункового перерізу

Сприйняття навантаження підрейковою основою найбільш інтенсивно збільшує ентропію системи в зоні перед колесом, що наближається, на відстані 25–45 см. Причому менші значення відстані відповідають більшим швидкостям руху та більшій глибині спостереження в підрейковій основі. Максимальні значення відповідають зонам контакту шарів різних матеріалів. З глибиною підрейкової осно-

ви інтенсивність зростання ентропії, а відповідно і накопичення залишкових деформацій, зменшується.

Виконано варіантні розрахунки для різних характеристик верхньої будови колії і різних навантажень. Аналіз отриманих результатів дав змогу представити збільшення інтенсивності вичерпання ресурсу системи при зростанні швидкості руху як поправочний коефіцієнт, який умовно збільшує масу поїзда для можливості використання існуючої методики оцінки за пропущеним тоннажем. Числові значення коефіцієнтів (табл. 5) складають від 1,1 до 1,5 для швидкостей руху пасажирських поїздів 121–320 км/год відповідно.

Таблиця 5 – Коефіцієнт умовного збільшення пропущеного тоннажу для врахування швидкості руху

Швидкість руху, км/год	до 120	121-160	161-210	211-250	251-290	291-320
$k$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальну науково-технічну проблему з розробки методології (системи стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії для впровадження швидкісного, а в середньостроковій перспективі й високошвидкісного руху поїздів як в Україні, так і у сполученні між Україною і європейськими державами. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають у такому:

1. Забезпечення високих значень швидкості руху поїздів повинно ґрунтуватися на наявності відповідних методико-розрахункових та нормативних документів. Більшість існуючих методик базуються на принципах, які доцільні тільки для прискореного руху – до 160 км/год. На підставі проведеного аналізу конструктивних характеристик колії, показників її технічного стану і експлуатаційних факторів сформульовано проблемні завдання, що виникають через відсутність теоретичної моделі, яка враховувала б динамічні процеси, що відбуваються в колійній інфраструктурі при високих швидкостях, що є визначальним фактором в забезпеченні надійного й безпечного функціонування залізничної колії на напрямках швидкісних залізниць.

2. Збільшення рівня швидкості руху впливає на процеси формування динамічних сил, що діють від колеса на рейку. За комплексним аналізом аналітичних розрахунків і результатів статистичної обробки експериментальних даних встановлено, що за впливовістю різних динамічних факторів можна відокремити такі швидкісні зони: до 100–120 км/год, 120–250 км/год, більше 250 км/год. Основним фактором збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів, які рухаються зі швидкістю 120 км/год і більше, є коливання системи «колесо–рейка», а саме – проходження колесом динамічної рейкової нерівності.

3. Нерівнопружність залізничної колії є одним з факторів ускладнення розрахунків напружено-деформованого стану. Розроблено принципи врахування як локальних змін модуля пружності підрейкової основи (наявність відхилень в

утриманні), так і сполучень ділянок конструктивно різної пружності (мости, переїзди) для розрахунків залізничної колії на міцність. Встановлено, що наявність локального зменшення пружності підрейкової основи (просадки) може збільшувати напруження в рейках до 25 %.

4. Розроблено принципово нову модель взаємодії колії і рухомого складу, яка, на відміну від існуючих, дає змогу визначати напружено-деформований стан залізничної колії з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечить можливість виконання розрахунків як для залізниць із звичайною швидкістю руху поїздів, так і для умов швидкісного й високошвидкісного руху. Адекватність моделі для вирішення поставлених задач підтверджена порівнянням результатів з експериментальними даними та з аналітичними методиками розрахунків при відповідній тотожності розрахункових умов.

5. Динамічні складові напружено-деформованого стану залізничної колії залежать від показників жорсткості шарів підрейкової основи. Чим менший модуль пружності, тим менша швидкість поширення напружень і, як наслідок, при менших швидкостях руху можуть спостерігатися динамічні ефекти, які виходять за межі використання квазістатичних розрахунків. Результати визначення модуля пружності підрейкової основи за розробленою методикою на основі експериментальних вимірювань напружень у рейках підтвердили, що його значення, особливо в літній період, можуть бути меншими за розрахункові, встановлені відповідно до чинних нормативів. Так, на дослідних ділянках, які належать до I категорії колії і не мають відхилень в утриманні більше ніж другого ступеня, було визначено модулі пружності підрейкової основи на рівні 22 і 35 МПа.

6. За результатами експериментальних досліджень для сучасних пасажирських поїздів отримано залежності динамічних значень вертикальної сили від швидкості руху до 200 км/год включно. Для локомотивів спостерігається майже лінійна залежність максимальної вірогідної сили від швидкості руху, що відповідає розрахункам за чинними методиками; для пасажирських вагонів кореляція між значеннями сили і швидкістю руху не виражена. Для низької швидкості (80 км/год) розподіл значень вертикальної сили, виміряних експериментально, майже повністю збігається з теоретичним розподілом за законом Гаусса; для високої швидкості руху (200 км/год) експериментально отриманий закон розподілу має асиметричне відхилення на 10 % у бік зменшення діючої сили.

7. Встановлено рівні швидкості руху відповідно до конструкції колії, при яких підрейкова основа не встигає реалізувати деформації по всій довжині формування прогину рейки, що призводить до принципових змін напружено-деформованого стану. При ґрунтах з невеликими модулями деформації (до 10 МПа) такі ефекти з'являються починаючи зі швидкості руху 210–250 км/год. Якщо земляне полотно складається з ґрунтів, які мають модуль деформації, достатній для забезпечення загального модуля пружності підрейкової основи на рівні 40–50 МПа і більше (що закладається в розрахунках колії на міцність), ефект неповної реалізації прогину рейки може з'явитися при доволі великих на сьогодні рівнях швидкості руху – 350–400 км/год.

8. Визначено принципи формування частини простору підрейкової основи, що взаємодіє з рухомим навантаженням, залежно від конструкції колії і швидкості руху поїздів. При високих значеннях швидкості руху динаміка зміни цієї області є одним із визначальних параметрів для моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії, обґрунтування розмірів розрахункового простору при застосуванні методів скінченних елементів, вирішення задач встановлення підсилюючих шарів, захисних споруд та ін. Для можливості виконання практичних розрахунків отримано числові варіантні результати та сформовано математичні вирази для аналітичного визначення обрису підрейкової основи, що бере участь у взаємодії.

9. Розширено підходи представлення залізничної колії в моделях рухомого складу, описаних системами рівнянь за принципом Лагранжа–д'Аламбера. Отримано значення коефіцієнтів жорсткості й дисипації залізничної колії залежно від конструкції і швидкості руху. Так, для колії з модулем пружності підрейкової основи 50 МПа вони змінюються від  $97 \cdot 10^3$  кН/м і 200 кН·с/м при швидкості руху 80 км/год до  $101 \cdot 10^3$  кН/м і 65 кН·с/м при швидкості руху 280 км/год відповідно.

10. Обґрунтовано закономірності розвитку нерівностей колії. Розташування вертикальної нерівності по довжині не обов'язково збігається з місцем розташування проблемної ділянки. З часом експлуатації вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й вздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та появою нових. Інтенсивність зростання амплітуди нерівності в місці її початкового утворення з часом експлуатації зменшується, але процес набуває розвитку в інших місцях, що, як правило, призводить до утворення так званих «ям» на підході до нерівнопружної ділянки.

11. Термін служби залізничної колії, особливо для ділянок швидкісного й високошвидкісного руху, не може визначатися тільки пропущеним тоннажем. Виконано теоретичні дослідження та отримано аналітичну методику для моделювання процесу накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи. Використання ентропії дало змогу описати старіння залізничної колії в міжремонтний період як випадковий процес накопичення деформацій у результаті динамічних реакцій на зовнішнє навантаження, виражених через показники механічної роботи. Така методика дає можливість враховувати параметри поїздопотoku, встановлені швидкості руху, характеристики конструкції колії тощо. Отримано коефіцієнти умовного збільшення пропущеного тоннажу для врахування швидкості руху поїздів. Вони становлять від 1,1 до 1,5 для швидкостей руху пасажирських поїздів від 121 до 320 км/год відповідно. Своєчасне виконання ремонтів дає змогу запобігти непродуктивним експлуатаційним витратам, пов'язаним з погіршенням технічного стану ділянки, які в середньому складають 450 тис. грн/км на рік.

12. Нові методи, положення й результати наукових досліджень використані ПАТ «Укрзалізниця» для розробки заходів щодо впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів та увійшли в нормативні документи Департаменту колії та споруд ПАТ «Укрзалізниця» і ТОВ «Грузинська залізниця», а також набули практичного застосування під час проведення сертифікаційних випробувань швидкісного рухомого складу на залізницях України й Казахстану. Методика і результати

досліджень, що наведені в дисертаційній роботі, використані для постановки кафедрою «Колія та колійне господарство» ДНУЗТ курсів лекцій і практичних занять з дисциплін «Проектування залізничної колії» і «Математичні методи та моделі в спеціальних задачах».

***Основні положення і результати дисертації опубліковані у виданнях, які індексовані в Index Copernicus і є фаховими:***

1. Курган Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: 10.15802/stp2015/38250.

2. Kurhan D. M. Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 2(56). – P. 136–145. doi: 10.15802/stp2015/42172

3. Курган Д. М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 3 (57). – С. 118–128.

4. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 4 (58). – С. 99–109.

5. Курган М. Б. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 5 (59). – С. 84–96.

6. Kurhan D. Modeling Of Development Vertical Deformation Of Railway Track / D. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – № 1(61). – С. 100–108.

7. Курган Д. М. Оцінка безпеки руху за умови забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки / Д. М. Курган, В. О. Губар // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 11. – С. 65–72.

8. Курган Д. М. Основи математичного опису хвильової моделі розповсюдження напружень в залізничній колії / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2016. – № 5(65). – С. 101–113.

9. Kurhan M. Forecasting of Passenger Traffic upon Implementation of High-Speed Running / M. Kurhan, D. Kurhan // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2017. – № 1(67). – P. 117–130.

***у закордонних виданнях:***

10. Курган Д. Н. Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений / Д. Н. Курган, И. А. Бондаренко // Problemy Kolejnictwa. – 2013. – № 159. – P. 99–111.

11. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State / D. Kurhan // Acta Technica Jaurinensis. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 83–96.

**у монографії:**

12. Курган М. Б. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган // –Дніпро : Вид-во ДНУЗТ, 2016. – 283 с.

**у фахових виданнях:**

13. Раціоналізація перебудови кривих в плані при підвищенні швидкостей руху поїздів / В. В.Рибкін, М. Б. Курган, В. І. Харлан, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип. 2. – С. 120–126.

14. Аналіз можливості застосування рухомого складу з примусовим нахилом кузова вагонів при організації швидкісного руху / А. П. Зубко, І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 4. – С. 156–164.

15. Курган М. Б. Визначення допустимої швидкості руху поїздів з примусовим нахилом кузовів вагонів у кривих ділянках колії / М. Б. Курган, В. І. Харлан, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 47–52.

16. Харлан В. І. Вирішення задач вибору раціональних швидкостей руху поїздів за допомогою математичного моделювання процесу експлуатації залізничної ділянки / В. І. Харлан, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 16. – С. 41–44.

17. Курган Д. М. Вплив стану залізничної ділянки і структури поїздопотоків на життєвий цикл колії / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 19. – С. 78–83.

18. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Ю. С. Бараш, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 20. – С. 233–239.

19. Курган Д. М. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць / Д. М. Курган, М. А. Заяц // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 88–93.

20. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 124–128.

21. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Зб. наук. пр. ДЕГУТ «Транспортні системи і технології». – Київ, 2011. – Вип. 18. – С. 14–18.

22. Оцінка економічної ефективності усунення обмежень швидкості руху поїздів, пов'язаних із станом залізничної колії / А. А. Босов, М. Б. Курган, Д. М. Курган, С. Ю. Байдак // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 106–115.

23. Бабенко А. І. Встановлення допустимої швидкості на складних ділянках плану залізниці з урахуванням комфортабельності їзди / А. І. Бабенко, Д. М. Курган, М. М. Черняков // Зб. наук. пр. Держ. економіко-технічн. ун-ту трансп. «Транспортні системи і технології». – Київ, 2012. – Вип. 21. – С. 9–15.

24. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформаційного стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 1 (43). – С. 139–148.

25. Бондаренко І. О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, В. Є. Савлук // Зб. наук. пр. – Донецьк : ДонІЗТ, 2012. – Вип. № 31. – С. 225–230.

26. Методика визначення допустимих швидкостей руху поїздів на складних ділянках плану залізниці / М. Б. Курган, Д. М. Курган, Н. П. Хмилевська, С. Ю. Байдак // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – N 2 (50). – С. 83–94.

27. Курган Д. М. Діагностування і виправка положення залізничної колії колійними машинами / Д. М. Курган, М. О. Гаврилов // Українська залізниця. – 2016. – № 8(38). – С. 60–64.

#### *Додаткові праці,*

##### *що є нормативними документами Укрзалізниці:*

28. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії. ЦП-0236 / М. Курган, А. Орловський, О. Патласов, В. Циганенко, Д. Курган. – Київ, 2011. – 52 с.

29. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України. ЦП-0266 / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, О. І. Белоусов, М. І. Карпов, Д. М. Курган, В. П. Шраменко, А. І. Бабенко, В. А. Штойко, І. О. Олійник, В. А. Лисак, К. Л. Каленик. – Київ, 2012. – 147 с.

30. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП-0269 / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, О. М. Патласов, М. І. Карпов, В. П. Шраменко, О. І. Белорусов, В. О. Яковлев, В. М. Молчанов, К. В. Корноухова, М. Б. Курган, Д. М. Курган, В. М. Твердомед, Р. М. Йосифович, О. О. Сорока. – Київ, 2012. – 456 с.

##### *у виданнях, що не є фаховими:*

31. Курган Д. М. Адаптація енергетичного методу оцінки безпеки утримання безстикової колії за показником стискаючої сили для інженерних розрахунків / Д. М. Курган, Н. М. Лапшева // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – №. 6. – С. 41–46.



**тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:**

32. Корженевич И. П. Определение плавности и комфортабельности езды в кривых на участках скоростного движения / И. П. Корженевич, Н. Б. Курган, Д. Н. Курган // Материалы науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – С. 431–439.

33. Патласов О. М. Дослідження щодо умов укладання безстикової колії з рейками типу UIC60 / О. М. Патласов, Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // 69-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2009. – С. 160–161.

34. Курган Д. М. Визначення раціонального розподілу поїздопотоків на мережі залізниць / Д. М. Курган, М. А. Заяц // 70-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. – С. 180–181.

35. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // 71-ша Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012 – С. 176–177.

36. Бондаренко І. О. Застосування теорії розповсюдження пружних хвиль для вирішення задач напружено-деформаційного стану залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // 71-ша Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2012 – С. 177–178.

37. Бондаренко І. О. Вирішення задач надійності системи на основі моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії засобами теорії розповсюдження пружних хвиль / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // XIII Международная конф. «Проблемы механики железнодорожного транспорта». – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2012. – С. 27–28.

38. Бондаренко І. О. Розрахунки напружень у пружному напівпросторі земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології. Матеріали VI Міжнародної науково-практ. конф. – Київ : ДЕТУТ, 2013. – С. 96.

39. Курган, Д. М. До вирішення задач моделювання напружено-деформованого стану залізничної колії з урахуванням часового параметру / Д. М. Курган, І. О. Бондаренко // Проблеми взаємодії колії та рухомого складу. Праці міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 73–74.

40. Курган Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність з урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. 74-та Міжнародна науково-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 256–257.

41. Курган Д. М. Особливості сприйняття залізничною колією динамічного навантаження при високих швидкостях руху / Д. М. Курган // Тези 75-ї Міжнарод-

ної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 221–222.

42. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи / Д. М. Курган // Тези 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2015. – С. 222–223.

43. Курган М. Б. Розвиток нерівностей залізничної колії в зонах нерівнопружності на прикладі переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // 78-ма Міжнародна конф. «Транспортне будівництво та залізнична колія». – Харків, 2016. – С. 93–94.

44. Kurhan D. M. Perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // XIV міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2016. – С. 74–75.

45. Курган Д. М. Моделювання життєвого циклу системи на основі ентропії системи / Д. М. Курган // 6-та науково-практ. міжнародна конф. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – С. 100–101.

## АНОТАЦІЯ

Курган Д. М. Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2017.

Дисертація присвячена проблемі створення методології (системи стратегій, методів і засобів) розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом. У роботі проаналізовано технічний стан колійної інфраструктури та наявність наукового забезпечення для впровадження швидкісного руху поїздів. Розроблено рекомендації щодо удосконалення існуючих аналітичних методів розрахунку напружено-деформованого стану залізничної колії з обґрунтуванням меж їх застосування. Створено математичну модель взаємодії колії та рухомого складу, яка дозволить визначати напружено-деформований стан залізничної колії з повноцінним просторово-часовим урахуванням динаміки прогину підрейкової основи, що забезпечить можливість виконання розрахунків для умов швидкісного й високошвидкісного руху поїздів. Проаналізовано особливості впливу сучасного пасажирського рухомого складу на напружено-деформований стан залізничної колії за результатами комплексу теоретичних і експериментальних досліджень. Визначено технічні параметри конструкції колії та умови її експлуатації, за яких можливо виникнення динамічних процесів взаємодії, що виходять за межі застосування квазістатичних методів розрахунків. Встановлено узагальнені закономірності та залежності для врахування динамічного прогину підрейкової основи в сучасних моделях взаємодії залізничної колії з рухомим складом. Розроблено метод оцінки впливу

швидкісного пасажирського руху в сучасних умовах на життєвий цикл експлуатації ділянки.

**Ключові слова:** верхня будова колії, швидкісний рух, високошвидкісний рух, взаємодія колії і рухомого складу, напружено-деформований стан, розрахунки колії на міцність, динамічний прогин, теорія пружності, поширення хвиль, ентропія, пасажирський рух, життєвий цикл.

## АННОТАЦІЯ

Курган Д. Н. Методология расчетов железнодорожного пути при взаимодействии со скоростным подвижным составом. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.06 – железнодорожный путь. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днипро, 2017.

Диссертация посвящена проблеме создания методологии (системы стратегий, методов и способов) расчетов железнодорожного пути при взаимодействии со скоростным подвижным составом. В работе проанализировано техническое состояние путевой инфраструктуры и наличие научного обеспечения для введения скоростного движения поездов. Разработаны рекомендации для усовершенствования существующих аналитических методов расчетов напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути с обоснованием границ их использования. Разработана пространственная модель динамических деформаций железнодорожного пути на основе теории упругости, которая дает возможность определять напряженно-деформированное состояние железнодорожного пути с полноценным пространственно-временным учетом динамики прогиба подрельсового основания. Проведен анализ особенностей влияния современного пассажирского подвижного состава на напряженно-деформированное состояние железнодорожного пути на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований. Установлены обобщенные закономерности и аналитические зависимости для учета динамического прогиба подрельсового основания в современных моделях взаимодействия пути и подвижного состава. Разработан метод оценки влияния скоростного пассажирского движения в современных условиях на жизненный цикл эксплуатации участка на основе энтропии системы.

**Ключевые слова:** верхнее строение пути, скоростное движение, высокоскоростное движение, взаимодействие пути и подвижного состава, напряженно-деформированное состояние, расчеты пути на прочность, динамический прогиб, теория упругости, распространение волн, энтропия, пассажирское движение, жизненный цикл.

## ABSTRACT

Kurhan D. M. Methodology for calculating the railway track at interaction with fast-speed rolling stock. – The qualification scientific work on the manuscript.

The dissertation in support for a Doctor of Technical Science degree, specialty 05.22.06 – railway track. – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2017.

The technical condition of the railway infrastructure and the availability of scientific support for the introduction of trains fast-speed movement has been analyzed. Recommendations for the improvement of existing analytical methods for calculating the stress-strain state of the railway track with the justification of their applicability bounds has been developed. Improved the method of analytical calculations of the stress-strain state for the railway track to take into account the uneven elasticity of the rail support. Proposed analytical expressions and correction factors allow, in contrast to existing methods, to take into account both local changes in the modulus of rail support elasticity and connection of sections of a constructively different stiffness when performing practical calculations of the railway track for durability. Justified values of speeds for various structures and operating conditions of the track, at which the full deflection of the rail fails to realize itself, that determines the adequate use boundaries of quasi-static methods of calculations were obtained.

The mathematical model of the rolling stock-track interaction has been developed, which will allow determining stress-strain state of the railway track with a complete spatial-temporal account of the deflection dynamics of the rail support. It will enable the implementation of calculations, including for conditions of fast-speed and high-speed movement of trains. The dynamic outline of the space of the railway track that interacts with the rolling stock was taken into account. Mathematical models of rolling stock-track interaction created by such principles, in contrast to the existing ones, make it possible to determine the stress-strain state of the railway track with a complete spatial-temporal account of the deflection dynamics of the rail support, which provides the possibility of performing calculations for conditions of fast-speed and high-speed movement of trains.

The peculiarities of the modern passenger rolling stock impact on the stress-strain state of the railway track based on results of a complex of theoretical and experimental studies has been analyzed. Expanded impact regularities of modern passenger trains on the stress-strain state of the railway track, based both on theoretical and experimental research. Obtained results broaden the existing concepts concerning distribution law of dynamic load on the track and allow justifying the choice of calculated forces when performing calculations for train speeds of 160 km / h and above.

Generalized regularities and dependencies for taking into account the dynamic deflection of the rail support in up-to-date models of rolling stock-track interaction has been established. The technical parameters of the track structure and the conditions of its operation, at which it is possible the emergence of dynamic interaction processes that go beyond the use of quasi-static methods of calculation has been determine. Mathematical dependencies that allow analytically determining the outline of the area space of the rail support taking part in the interaction at a given timestamp of the calculation were ob-

tained. They can be used to solve the problems of installing the reinforcement layers, protective structures, justification of the calculated space size when simulation of the railway track with finite element methods, etc. Theoretically grounded stiffness coefficients and dissipation of the railway track as a component for calculating the dynamics of rolling stock in up-to-date models based on systems of equations and compounded on the Lagrange-d'Alembert principle were obtained. The set values, in contrast to those given in other sources, have a substantiated dependence in relation to the structure of the track and speeds of movement.

Analytical methods for assessing the life cycle of railway track sections based on entropy of system were developed. The use of entropy made it possible to represent the aging of the railway track during the time between maintenance as probabilistic process of strain accumulation in reaction to the external load, expressed through the indices of mechanical work. This approach, unlike the existing ones, allows defining the terms of operation of the railway track not only by missed tonnage, but also taking into account the structure of train traffic, including the impact of fast-speed and high-speed passenger traffic.

**Keywords:** permanent way, fast-speed railway, high-speed railway, rolling stock-track interaction, stress-strain state, track calculations for strength, dynamic deflection, elasticity theory, distribution of waves, entropy, passenger traffic, life cycle.



**КУРГАН ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ**

**МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ  
ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З ШВИДКІСНИМ РУХОМИМ СКЛАДОМ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку 25.09.2017 р.  
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 2,0.  
Наклад 100 пр. Зам. № 205.

Видавництво і друкарня «Ліра»  
49107, м. Дніпро, вул. Наукова, 5  
Свідоцтво про внесення до Держреєстру  
ДК №188 від 19.09.2000

