

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.1-027.45

І. О. БОНДАРЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, ел. пошта irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

### ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМАТИВНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

**Мета.** В дослідженні передбачається визначення особливості деформативної роботи залізничної колії за рахунок встановлення меж стійкості рейкової колії, у залежності від конструкції та стану систем верхньої та нижньої будов колії, плану лінії для можливості формування нормативної бази з надійності та функціональної безпеки залізничної колії України. **Методика.** Для досягнення мети використано повну методику С. П. Першина щодо визначення критичних значень стискаючої сили. **Результати.** Автором встановлено, що співвідношення мінімальних значень стискаючої сили при певних деформаціях вигину можуть бути застосовані як оціночні умови деформативної стійкості колії та основи для формування бази з надійності та функціональної безпеки залізничної колії України. **Наукова новизна.** Запропоновано теоретичні положення для розгляду деформативної стійкості системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії, що порушуються рухомих складом. Це дозволить дослідити процес деформативної роботи зазначеної системи, при якому відбуваються зміни її станів протягом встановленого напрацювання. Отже, це дозволить визначити параметри функціональної надійності руху поїздів як складової безпеки пропуску рухомого складу по ділянці колії із урахуванням її технічного стану. **Практична значимість.** Зазвичай для безпечного пропуску рухомого складу визначаються параметри процесу коливань системи «екіпаж – колія». Ці параметри нормовано інструкціями з улаштування та утримання рейкової колії. Але зміни нормативної бази залізничного транспорту за останні роки передбачають дотримання його функціональної безпеки, які в існуючих нормативах стосовно залізничної колії не враховані. Тому необхідно питання про оцінку впливу дії рухомого складу на колію розглядати як динамічний процес, критерії граничних станів якого обумовлені на підставі існуючих нормативів, співвіднесених зі станами надійності, а на їх основі розробити критерії безпеки протягом всього життєвого циклу. При розгляді динамічного процесу коливання колії та рухомого складу необхідно враховувати деформативну стійкість колії. Це питання розглядалось тільки з точки зору зміни температурних деформацій. Дане дослідження надає засади, при яких можна враховувати й жорсткісні деформації для можливості формування нормативної бази з надійності та функціональної безпеки залізничної колії України.

*Ключові слова:* деформативна робота колії; стійкість колії; надійність колії

#### Вступ

Умови обертання рухомого складу це умови, що забезпечують безпеку руху, дотримання правил обслуговування та утримання, а також допустимий вплив на залізничну колію (за умови обов'язкового виконання яких рухомий

склад залізниць може застосовуватися в перевізному процесі). Спочатку під конкретні умови обертання рухомого складу (вантажонапруженість і встановлені швидкості руху) визначаються характеристики підсистеми інфраструктури залізничного транспорту, яка включає в себе верхню будову колії, земляне полотно,

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

водовідвідні, протидеформаційні, захисні та укріплювальні споруди земляного полотна, розташовані в смузі відводу, а також штучні споруди. А вже в процесі експлуатації коригуються умови обертання відповідно до стану підсистеми інфраструктури залізничного транспорту. І при незадовільному стані підсистеми її реконструюють під необхідні експлуатаційні умови. Цикл зміни умов обертання рухомого складу складається з двох операцій. Проте в реальності цей процес набагато складніший.

Всі існуючі нормативні методики розрахунків показників впливу дії рухомого складу залізниць на залізничну колію засновані на виконанні вимог міцності і стійкості. При цьому не завжди їх виконання приводить до позитивного результату, оскільки відсутні чіткі взаємозв'язки між розрахунками за різними методиками. Наприклад, розрахунок стійкості земляного полотна жодним чином не пов'язаний з розрахунком його міцності. Крім того, відсутність критеріїв за деформативними характеристиками складових частин верхньої і нижньої будов призводить, по-перше, до нерівнопружності залізничної колії по довжині, по-друге, до неможливості забезпечення на всіх ділянках залізничних ліній існуючих нормативних значень параметрів напружено-деформованого стану та ресурсу, втретє, до незабезпечення вимог безпечної експлуатації протягом життєвого циклу. Таким чином, існуючі методи і методики оцінки показників впливу рухомого складу на колію не забезпечують свого головного призначення: забезпечення експлуатаційної надійності підсистем інфраструктур.

Основним напрямком зміни нормативної бази залізничного транспорту за останні роки стало врахування питань з безпеки інфраструктури залізничного транспорту. Так, прийняті і такі що розробляються стандарти: ГОСТ 32192-2013 «Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения», ГОСТ (проект) «Безопасность функциональная. Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта», ГОСТ (проект) «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте», зміни, що вносяться в технічний регламент Митного союзу «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта».

Основна вимога з метою забезпечення безпеки до залізничної колії зводиться до того, що всі складові частини залізничної колії (земляне полотно, верхня будова колії та ін.) та елементи складових частин залізничної колії (рейки, стрілочні переводи, рейкові скріплення, шпали, баласт і ін.) по міцності, несучій здатності і стійкості повинні забезпечувати безпечний рух залізничного рухомого складу з найбільш швидкостями в межах допустимих значень протягом усього життєвого циклу. При цьому верхня будова колії та земляне полотно повинні забезпечувати стабільність положення залізничної колії в плані і поздовжньому профілі як в навантаженому, так і в ненавантаженому стані протягом всього періоду експлуатації. Геометричні параметри кривих повинні встановлюватися таким чином, щоб забезпечувати стійкість залізничного рухомого складу, яка перешкоджає сходу його коліс з рейок і перекиданню. А конструкція безстикової колії повинна виключати викиди рейко-шпальної решітки при одночасному впливі поїзних і температурних навантажень.

Внесено зміну, яка полягає в дотриманні функціональної безпеки: властивості об'єкта залізничного транспорту виконувати необхідні функції безпеки при всіх передбачених умовах протягом заданого періоду часу. Узагальнюючим показником безпеки, який визначає необхідний ступінь впевненості в тому, що об'єкт буде виконувати задані функції безпеки, є рівень повноти безпеки. Це кардинально змінює принцип, закладений при оцінці впливу дії рухомого складу на колію, від оцінки ризиків на основі правил до оцінки ризиків на основі міркувань безпеки. Раніше було достатньо перевірити відповідність розрізаних показників по плоских статичних моделях (за своєю суттю). Внесена зміна не регламентує розгляд не моменту часу (при якому враховані всі несприятливі умови для окремо розглянутої площини), а динамічного процесу зміни стану експлуатаційної надійності залізничної колії. Цей процес повинен бути класифікований за комплексною оцінкою положення рейкових ниток в плані і профілі, дефектів рейок, що впливають на їх форму, пружних властивостей колії, при відстеженні горизонтального і вертикального переміщень колеса щодо рейки і проміжок часу, протягом якого відбуваються ці переміщен-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ня. Критерії класифікації повинні повністю оцінювати стан залізничної колії відповідно станам надійності.

Враховуючи вищевикладене, можна констатувати факт, що жодна з існуючих нормативних методик не впорається з поставленим завданням. У той же час перехід на цифровий запис експериментальних досліджень [4] повністю підготував їх до верифікації та валідації даних для документованого підтвердження того, що об'єкт виконує всі задані вимоги до функціональної безпеки як складової частини надійності, а сучасні методи зйомки просторової геометрії колії [14] дозволяють контролювати ці вимоги.

Надійність і безпека об'єкта залізничного транспорту залежить від трьох факторів: через джерела відмов, що відбуваються всередині об'єкта на будь-якому етапі життєвого циклу (системні умови), через джерела відмов, що виникають під час експлуатації об'єкта (умови експлуатації), через джерела відмов, що виникають в об'єкті під час технічного обслуговування (умови технічного обслуговування). При реалізації конкретної залізничної системи необхідно визначити фактори, які можуть впливати на її надійність і безпеку, оцінити їх вплив і здійснювати управління причиною цих впливів протягом усього життєвого циклу за допомогою застосування відповідного системного управління для оптимізації показників роботи цієї системи. Тому необхідно питання про оцінку впливу дії рухомого складу на колію розглядати як динамічний процес, критерії граничних станів якого зумовлені на підставі існуючих нормативів, співвіднесених зі станами надійності, а на їх основі розробити критерії безпеки протягом всього життєвого циклу.

Динамічна деформативність колії – виникнення під впливом навантаження конструкції колії деформацій, викликаних змінами форми, розмірів або об'єму елементів за рахунок вібрації елементів конструкції колії чи їхніх частин, змін властивостей матеріалів елементів та зумовлені всіма перемінами переміщення окремих точок конструкції колії. Під процесом деформативної роботи колії будемо розуміти явища динамічної деформативності, що відбуваються під впливом рухомого складу.

Роботи з вивчення динамічних процесів ведуться в різноманітних напрямках. Теоретичну частину, зазвичай, розробляють науковці фізи-

ко-математичного напрямку, а науковці технічного напрямку поширюють розробки з врахуванням особливостей цього процесу. Так в роботі [6], розроблено алгоритм побудови хвильових полів, які генеруються рухомими осцилюючими навантаженнями в гетерогенному шаруватому півпросторі і пакеті шарів. Виконано натурний експеримент реєстрації хвильових полів, які генеруються в основі магістралі поїзного навантаження, що підтвердив висновки теоретичних досліджень. Але складність полягає в тому, що збуджувані хвильові поля несуть в собі інформацію, з одного боку, про інтегральні параметри рухомого складу, а з іншого – про параметри баластної призми і ґрунтового середовища, тому вони дають змогу аналізувати характеристики на основі порівняння, тобто виконувати якісний аналіз.

В роботі Веричева С. Н. [2], який продовжує школу Весницького А. І., досліджується стійкість коливань двомасового осцилятора, який рівномірно рухається по балці моделі Бернуллі-Ейлера, що лежить на в'язко-пружному півпросторі. Недоліком є те, що вводиться еквівалентна жорсткість півпростору і завдання зводиться до вирішення задачі про коливання балки на одновимірній основі, оскільки деформативні характеристики колії є дуже слабким місцем. Хоча принципово важлива відмінність полягає в тому, що еквівалентна жорсткість півпростору не є константою, а залежить від частоти і хвильового числа в балці.

Дуже багато досліджень присвячені впливу динамічних коливань колії на коливання ґрунтів та споруд, що знаходяться поруч. Вони, зазвичай, базуються на експериментах. Прикладом з визначення несучої здатності ґрунтів, може бути робота Абдукамілова Ш. Ш. [5], де виконані польові, лабораторні та теоретичні дослідження. Польові експерименти виконані на лінії Навої – Учкудук – Мискен залізниць Узбекистану. Результати польових досліджень оброблялися з використанням методів математичної статистики. Лабораторні випробування з вивчення впливу величини вібродинамічного навантаження на властивості міцності барханних пісків виконані на вібростабілометричній установці конструкції ЛПЖТу. У роботі виконані розрахунки, на основі яких розроблена методика розрахунку та прогнозування несучої здатності земляного полотна, відсипаного бар-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ханними пісками, що сприймають вібродинамічне навантаження. Також прикладом робіт такого напрямку є робота [9], де розглянуто динамічні навантаження протягом сезонів та встановлено різницю характеристик вказаного процесу при різних станах ґрунтів. Перевагою таких робіт є різноманітні дослідження поведінки конкретних ґрунтів, але основним недоліком є неможливість розповсюдження отриманих результатів на основі з інших ґрунтів, інші умови експлуатації та інші кліматичні зони.

У зв'язку з постійною потребою збільшення ваги вантажних поїздів, швидкостей пасажирських поїздів та пропускної спроможності залізничних ліній, а також відсутності вільного простору в населених пунктах, підвищення інтенсивності залізничного транспортного шуму і вібрації може стати спільною екологічною проблемою в майбутньому. Тому дуже багато досліджень виконується в цьому напрямку. Так в роботі [11] розглянуто цю проблему в рамках міських хорватських трамвайних та залізничних ліній. В роботі [7] описано досягнення щодо зниження шуму та вібрації, що виконуються за програмою в Німеччині до 2020 р. В роботі [12] описано досвід гонконгських залізничних мереж, протяжність яких сягає 211 км щодо планування та контролю за шумом у великих містах. Ці роботи не дають удосконалення для розрахунку поширення коливань від дії рухомого складу, але значно розширюють інформацію стосовно цих процесів та їх вплив на оточуюче середовище. Крім того, на їх підставі формуються критерії шуму та віброзахисту.

Проблему забезпечення надійної роботи залізничної колії з точки зору обробки існуючої інформації та прогнозування на її підставі імовірності ризиків розглянуто в роботі Касімова Б. Р. [4]. Запропоновано підвищення коефіцієнта готовності колії за рахунок зниження ризиків, що ґрунтується на підвищенні обізнаності та підготовленості до подій. Але не можна врахувати всі майбутні ризиковані події тільки за спостереженням виходу елементів верхньої будови колії та зміни експлуатаційних умов. Для прогнозування необхідно враховувати поведінку й нижньої будови колії, адже вона має найбільший термін служби, ніж всі елементи залізничної колії. Отже, прогнозування буде мати похибки, якщо не забезпечувати

однаковий стан земляного полотна при подальшій експлуатації, але напрям сучасно розширює поняття працездатного стану колії.

При вивченні коливань системи «екіпаж-колія» сформовано два напрями досліджень: вивчення коливань рухомого складу та вивчення коливань колії. Обидва напрями вивчають коливання дослідного об'єкта за умови, що партнер по взаємодії задається певним збуджуючим коливанням. Обидва напрями не враховують відклик партнера від взаємодії.

Дослідження коливань з конструкцій верхньої та нижньої будови колії зводяться до вивчення коливань рейки при певних впливах рухомого складу та певних характеристиках підрейкової, а іноді підшпальної, основи. Результатами таких досліджень є напружено-деформований стан, що характеризує міцність та витривалість.

Коливання рухомого складу вивчаються більш широко. Але при їх дослідженні коливання системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії подають як набір збуджуючих коливань. Функції, що описують ці коливання, навіть не мають чіткої залежності від характеристик елементів системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії.

Експериментальні дослідження зводяться до визначення станів рухомого складу та колії в конкретних перетинах, та відповідності цих станів нормативам. Вивчення взаємодії рухомого складу та колії за допомогою тензометричних пар не набуло розвитку з причин необхідності розробки нових підходів, методів і параметрів оцінки цього процесу та відсутності задач, що спонукають для розробки нових впроваджень.

У всіх виданнях, що присвячені коливанням системи «екіпаж-колія», зазначено, що коливання рухомого складу приносять багато збитків. Вони призводять до розладів колії, порушують плавність ходу, іноді можуть призвести до сходу екіпажа з рейок. Коливання екіпажа викликаються багатьма причинами: нерівностями колії; нерівнопружністю рейкових опор; режимом тяги та її силою; нерівностями на колесах рухомого складу.

Види та розмах коливань рухомого складу, їх наростання або згасання залежать як від конструктивних особливостей рухомого скла-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ду, так і систем конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії. При цьому до цього часу досліджуються нерівності рейок, як першопричини цих коливань, але з точки зору появи нерівностей як абразивного, так і адгезивного зносу рейок.

Вважається, що резонансні явища в рейці між суміжними колесами візків при динамічній взаємодії ходових частин з верхньою будовою колії виникають завжди, та вони є лише необхідною, але не достатньою умовою утворення та подальшого розвитку хвилеподібних нерівностей при експлуатації. Достатньою умовою для утворення хвилеподібних нерівностей рейок є експлуатація на ділянці колії однотипного рухомого складу у вузькому діапазоні швидкостей руху, що включає резонансні швидкості руху [1]. Методи боротьби з цим явищем пропонують за рахунок застосування розрахункових інтервалів оптимальних швидкостей руху, при яких відсутні резонансні швидкості. При цьому немає обґрунтування, чому такі заходи по зміні експлуатаційних умов системи конструкції верхньої та нижньої будов залізничної колії не призведуть до зміни характеристик у зазначеній системі і до тих же проблем, з якими проводилась боротьба.

Тому необхідно виконати дослідження процесу розповсюдження коливань при деформативній роботі систем конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії. Існує декілька основних теоретичних моделей для дослідження зазначених проблем: балка на півпросторі, балка на двошаровій основі, конструкція колії за канонами методу кінцевих або граничних елементів. Так в роботі [8] розглянуто піддатливість залізничних ліній за допомогою моделі балки на півпросторі та за допомогою методу кінцевих елементів. У роботі [16] порівняно розрахунки вібрацій у метрополітені, виконаних для моделі, що описана за методом граничних елементів, та за запропонованим методом «труба в трубі». У запропонованому методі тунель стіни та земля, що оточує її, моделюються у вигляді двох концентричних труб з використанням засад теорії пружності континууму. Роботи [10, 15] є продовженням напрямку твердотільних досліджень, що розвинуті завдяки удосконаленню характеристик, отриманих за експериментами та використанням методу кінцевих елементів. В роботі науковців універ-

ситету Лафборо (Великобританія) [13] зібрано аналіз отриманих емпіричних даних та надано оцінку моделей, що застосовуються при розрахунку коливань в основі колії від впливу рухомого складу, та рекомендації щодо подальшого коригування моделей.

**Мета**

Мета виконаних досліджень – визначити особливості деформативної роботи залізничної колії за рахунок встановлення меж стійкості рейкової колії залежно від конструкції і стану систем верхньої та нижньої будов колії, плану лінії для можливості формування нормативної бази з надійності та функціональної безпеки залізничної колії України.

**Методика**

Зі збільшенням подовжніх стискаючих сил в рейках відбувається збільшення запасу потенційної енергії. При певній величині стискання потенційна енергія, яка накопичується в рейках, стає настільки великою, що рейко-шпальна решітка в заданому положенні стає нестійкою. Наслідком цього може бути викид колії в сторону або вверх, який супроводжується звільненням «залишкової» потенційної енергії. За рахунок цієї енергії відбувається різкий вигин рейок, при якому долається вага рейко-шпальної решітки, опір баласту і інші фактори, завдяки чому енергія стискання зменшується. Її запас в рейках остаточно деформованої колії відповідає новому стану стійкої рівноваги між факторами протидії викривленню та стискаючий силі, яка має значно меншу величину.

Таким чином, розрахунок стійкості зводиться до визначення умов рівноваги стиснутої подовжніми силами рейко-шпальної решітки і величини останніх. Розрахунок виконано за повної формули з визначення критичної сили, запропонованої С. П. Першиним.

Умову рівноваги встановлюють виходячи з принципу можливих переміщень, прирівнюючи до нуля суму елементарних робіт на будь-якому можливому переміщенні:

$$\frac{\sum dA_i}{d\Delta f} = 0,$$

$$\sum dA_i = A_c + A_u + A_{скр} + A_{бал},$$

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

де  $A_c$  – робота стискаючої сили  $P_t$  на кінцях викривлення з хордою  $l$ , початковою стрілою  $f_0$  та прогином  $\Delta f$  при постійному коефіцієнті  $\eta_1$ , який залежить від прийнятої форми викривлення:

$$A_c = -P_t \eta_1 \frac{\Delta f^2 + 2\Delta f f_0}{l},$$

де  $l$  – довжина хорди викривлення, якою замінюють довжину викривленої частини пліті, коливається в межах 300–1 600 см;  $\Delta f$  – стріла від додаткового прогину, що виникає під час появи стискаючих сил, коливається в межах 0,05–4 см;  $f_0$  – стріла початкового викривлення, що характеризує стан колії, коливається в межах 0,1–0,4 см;  $A_u$  – робота вигину рейок

$$A_u = \eta_u \frac{EI \Delta f^2}{l^3},$$

де  $E$  – модуль пружності рейкової сталі,  $2,1 \times 10^5$  МПа;  $I$  – момент інерції рейкошпальної решітки відносно горизонтальної;  $\eta_u$  – постійний коефіцієнт, який залежить від прийнятої форми викривлення;  $A_{\text{бал}}$  – робота додання сил опору баласту:

$$A_{\text{бал}} = \eta'_c g_0 \Delta f l + \eta''_c c' \Delta f^2 l,$$

де  $\eta'_c$  та  $\eta''_c$  – постійні коефіцієнти, які залежать від прийнятої форми викривлення;  $c'$  – сила, що прикладена до одиниці довжини балки та викликає поперечне зміщення на одиницю;  $g_0$  – сила, що прикладена до одиниці довжини балки та викликає подовжнє зміщення на одиницю;  $A_{\text{скр}}$  – робота додання сил опору скріплень.

$$A_{\text{скр}} = \frac{2m'_0}{a} \eta_1 \frac{\Delta f^2}{l},$$

де  $a$  – відстань між осями шпал: при епюрі 2 000 шт./км – 50 см, 1 840 шт./км – 54,30 см, 1 600 шт./км – 62,5 см;  $m'_0$  – реактивний момент, який залежно від затягування клеми при 11 кгс становить 13200 кг/см, при 22 кгс – 19 600 кг/см, при 33 кгс 26100 кг/см;

Розв'язання рівняння (1) надає залежності між силовими та геометричними факторами.

Стискаюча сила спочатку збільшується, досягаючи максимуму, а потім спадає, що відповідає викиду.

Підставляючи в формулу (1) вирази всіх робіт, отримуємо повну формулу. Повна формула для визначення значення сили має вигляд:

$$P = \left[ 48,446 \frac{EI \Delta f}{l^2} + 0,078 l^2 \xi_1 c \Delta f^n + \frac{2m_0}{a} \xi_2 l \left( \frac{\Delta f}{l} \right)^k \right] \times \frac{1}{\Delta f + f_0 + 0,078 \frac{l^2}{R}} \quad (1)$$

$c$  – модуль деформації, тобто сила, що прикладена до одиниці довжини балки та викликає зміщення на одиницю, знаходять за формулою:

$n$  – коефіцієнт, що виражає відношення повної довжини деформованої ділянки до довжини скривленої частини, коливається в межах 1/2...1/8;  $k$  – коефіцієнт, що враховує форму пружної балки, коливається в межах 1/2...1/8;  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  – емпіричні коефіцієнти, що залежать від значень  $n$  і  $k$ , значення яких наведено в табл. 1;  $R$  – радіус кривої.

Таблиця 1

## Значення емпіричних коефіцієнтів

Table 1

## The values of empirical coefficients

Величина постійних	Значення показників ступеня $n$ та $k$		
	1/2	1/3	1/4
$\xi_1$	0,838	0,885	0,907
$\xi_2$	0,594	0,505	0,463

Закінчення табл. 1

End of table 1

Величина постійних	Значення показників ступеня $n$ та $k$			
	1/5	1/6	1/7	1/8
$\xi_1$	0,925	0,936	0,948	0,953
$\xi_2$	0,444	0,432	0,421	0,413

Середній уклон початкової нерівності можна визначити за формулою:

$$i = \frac{f_0 l}{2}.$$

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Для кожної конструкції та стану колії всі значення, що входять в формулу (1), є постійними, крім  $l, \Delta f, f_0$ . Таким чином, подовжня сила  $P$  є функцією  $P_l = \varphi(\Delta f, f_0, l)$  і може бути подана як «сідловинна» поверхня, яка і є межею стійкості рейкової колії.

## Результати

Зазвичай використовують значення подовжньої сили для визначення температурного інтервалу закріплення рейкової колії. Але подовжня сила може бути викликана не тільки змінами температурних деформацій, а й зміна-

ми жорсткісних деформацій. При певних деформаціях вигину досягається максимум стискаючої сили, що й характеризує критичний стан нестійкої рівноваги при певній довжині хорди викривлення. Але для кожного значення  $l$  існують свої значення максимальної стискаючої сили та відповідні до цього значення прогини  $\Delta f, f_0$ .

В табл. 2 наведено розрахунок значень стискаючої сили за методикою С.П. Першина прямої ділянки колії з рейками типу UIC60 при «справному» земляному полотні, тобто таким, що працює в пружній стадії.

Таблиця 2

Table 2

Значення стискаючої сили за повною методикою С.П. Першина  
The value of compressive strength according to the full method of S. P. Pershyn

Довжина хорди викривлення, см	Стріла початкової нерівності, см	Стискаюча сила кН в умовах рівноваги при прогині, см									
		0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
200	0,2	6 722	1 0079	15 545	19382	21 181	22 224	22 904	23 383	23 738	24 011
300	0,3	3 513	4 696	6 764	8384	9 202	9 695	10 023	10 258	10 433	10 569
400	0,4	2 922	3 496	4 441	5172	5 541	5 763	5 910	6 014	6 092	6 151
500	0,5	2 913	3 275	3 762	4062	4 185	4 246	4 279	4 298	4 309	4 316
600	0,6	3 093	3 377	3 660	3731	3 704	3 658	3 611	3 568	3 529	3 494
700	0,7	3 348	3 611	3 807	3749	3 624	3 503	3 396	3 304	3 225	3 156
800	0,8	3 638	3 908	4 074	4 489	4 242	4 018	3 825	3 660	3 519	3 397
900	0,9	4 589	4 922	5 099	4 879	4 584	4 313	4 077	3 874	3 700	3 548
1 000	1	4 984	5 353	5 563	5 331	5 004	4 696	4 425	4 189	3 984	3 804
1 100	1,1	5 385	5 796	6 050	5 822	5 474	5 138	4 837	4 572	4 340	4 135
1 200	1,2	5 790	6 245	6 552	6 341	5 980	5 622	5 296	5 006	4 749	4 521
1 300	1,3	6 198	6 700	7 065	6 878	6 512	6 137	5 790	5 477	5 198	4 948
1 400	1,4	6 608	7 157	7 586	7 429	7 063	6 676	6 311	5 978	5 679	5 409
1 500	1,5	7 019	7 618	8 111	7 991	7 629	7 233	6 854	6 504	6 185	5 897
1 600	1,6	7 432	8 079	8 641	8 560	8 206	7 805	7 414	7 048	6 713	6 408

Отже, визначення таких співвідношень за методикою С. П. Першина надає межі для формування нормативної бази з надійності колії з урахуванням її деформативних особливостей.

Та за умови використання методики розрахунку параметрів деформативності колії зі застосуванням теорії розповсюдження хвильового процесу під часу опису взаємодії колії та рухо-

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

мого складу можна визначити, при яких геометричних, силових та швидкісних параметрах рухомого складу будуть мати місце отримані співвідношення.

### Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано теоретичні положення для розгляду деформативної стійкості системи конструкцій верхньої та нижньої будов колії, що порушуються рухомим складом. Це дозволить дослідити процес деформативної роботи зазначеної системи, при якому відбуваються зміни її станів протягом встановленого напруження. Отже, це дозволить визначити параметри функціональної надійності руху поїздів, як складової безпеки пропуску рухомого складу по ділянці колії з урахуванням її технічного стану.

Зазвичай для безпечного пропуску рухомого складу визначаються параметри процесу коливань системи «екіпаж – колія». Ці параметри нормовано інструкціями з улаштування та утримання рейкової колії. Але зміни нормативної бази залізничного транспорту за останні роки передбачають дотримання його функціональної безпеки, які в існуючих нормативах стосовно залізничної колії не враховані. Тому необхідно питання про оцінку впливу дії рухомого складу на колію розглядати як динамічний процес, критерії граничних станів якого зумовлені на підставі існуючих нормативів співвіднесених зі станами надійності, а на їх основі розробити критерії безпеки протягом всього життєвого циклу. При розгляді динамічного процесу коливання колії та рухомого складу необхідно враховувати деформативну стійкість колії. Це питання розглядалось тільки з точки зору зміни температурних деформацій. Це дослідження надає засади, на яких можна враховувати й жорсткісні деформації для можливості формування нормативної бази з надійності та функціональної безпеки залізничної колії України.

### Висновки

Обізнаність в процесах взаємодії колії та рухомого складу призводить до розглядання нових задач. Одним з нових аспектів цього процесу є розв'язання задач надійності колії.

Складовою надійності колії є функціональна безпека колії. Таким чином, напрямок досліджень є актуальним, але таким, що потребує нового підходу при вирішенні поставленої проблеми.

При дослідженні процесу деформативності в елементах системи конструкцій верхньої та нижньої будов залізничної колії необхідно точне визначення цього процесу як в часі, так і в просторі. Таким чином необхідно не тільки правильно описати процес розповсюдження збуджень від рухомого складу, що протікає в зазначених елементах, а й мати оціночні критерії цього процесу. Основні положення щодо встановлення особливостей деформативної роботи залізничної колії полягають у такому:

– основним напрямком зміни нормативної бази залізничного транспорту за останні роки стало врахування питань з безпеки інфраструктури залізничного транспорту. Внесена зміна регламентує розгляд динамічного процесу зміни стану експлуатаційної надійності залізничної колії та класифікацію цього процесу за комплексною оцінкою положення рейкових ниток в плані і профілі, дефектів рейок, що впливають на їх форму, пружних властивостей колії, при відстеженні горизонтального і вертикального переміщень колеса щодо рейки і проміжок часу, протягом якого відбуваються ці переміщення. Критерії класифікації повинні повністю оцінювати стан залізничної колії відповідно до станів надійності;

– відсутність критеріїв за деформативними характеристиками складових частин верхньої і нижньої будов призводить, по-перше, до нерівнопружності залізничної колії по протязі, по-друге, до неможливості забезпечення на всіх ділянках залізничних ліній існуючих нормативних значень параметрів напружено-деформованого стану та ресурсу, по-третє, до незабезпечення вимог безпечної експлуатації протягом життєвого циклу. Таким чином, існуючі методи і методики оцінки показників впливу рухомого складу на колію не забезпечують свого головного призначення: забезпечення експлуатаційної надійності підсистем інфраструктур;

– введення оцінки деформативних параметрів, які враховують жорсткісну стійкість колії на підставі застосування співвідношень, отриманих за методикою С. П. Першина, до-



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

звolyають сформувати нормативну базу з надійності та функціональної безпеки залізничної колії України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алижан, А. Исследование влияния волнообразных неровностей поверхности качения рельсов на динамику рельсовых экипажей / А. Алижан, Е. Г. Адильханов // Вестн. Казах. акад. трансп. и коммуникации им. М. Тынышпаева. – Алматы, 2008. – № 6. – С. 80–86.
2. Веричев, С. Н. Математические методы исследования устойчивости объекта, движущегося по упругой направляющей / С. Н. Веричев // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2008. – № 4. – С. 117–121.
3. Використання цифрової виміральної 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.
4. Касимов, Б. Р. Методика прогнозирования состояния путевой безопасности / Б. Р. Касимов // Промышл. трансп. Казахстана. – Алматы, 2014. – № 1. – С. 19–23.
5. Корнилов, С. Н. Результаты экспериментального изучения прочностных характеристик барханских песков, слагающих железнодорожное земляное полотно / С. Н. Корнилов, Ш. Ш. Абдукамилов // Вестн. Магнитог. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2015. – Вып. 1. – С. 105–110.
6. Суворова, Т. В. К расчету волнового поля, возбуждаемого встречными осциллирующими нагрузками в гетерогенном полупространстве / Т. В. Суворова, С. А. Усошин // Транспорт. – 2011 : тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Москва, 2011. – Ч. 1. – С. 17–19.
7. Advancements in Noise and Vibration Abatement to Support the Noise Reduction Strategy of Deutsche Bahn / B. Schulte-Werning, B. Asmussen, W. Behr [et al.] // Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. – 2012. – Vol. 118. – P. 9–16. doi: 10.1007/978-4-431-53927-8\_2.
8. Auersch, L. The Influence of the Soil on Track Dynamics and Ground-Borne Vibration / L. Auersch // Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. – 2008 – Vol. 99. – P. 122–128. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9\_17.
9. Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai–Tibet railway in China / X.-Zh. Ling, S.-J. Chen, Zh.-Y. Zhu [et al.] // Cold Regions Science and Technology. – 2010. – Vol. 60. – Iss. 1. – P. 75–83. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.08.005.
10. Ground-Borne Vibration due to Railway Traffic: A Review of Excitation Mechanisms, Prediction Methods and Mitigation Measures / G. Lombaert, G. Degrande, S. Francois, D. J. Thompson // Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. – 2008. – Vol. 126. – P. 253–287. doi: 10.1007/978-3-662-44832-8\_33.
11. Lakušić, S. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas / S. Lakušić, M. Ahac // Technical Gazette. – 2012. – Vol. 19. – Iss. 2. – P. 427–435.
12. Planning and Controlling Railway Noise in a Metropolis: Our Practical Experience / B. Lee, W. Chau, J. Lam, M. Yeung // Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. – 2012. – Vol. 118. – P. 17–23. doi: 10.1007/978-4-431-53927-8\_3.
13. Procedures for estimating environmental impact from railway induced vibration : a review / J. Avillez, C. Skinner, M. Frost [et al.] // ASME Proc. Noise Control And Acoustic Division Conference at InterNoise 2012 (19.08.–22.08. 2012). – New York, 2012. – P. 381–392. doi: 10.1115/ncad2012-1083.
14. Rail and Contact Line Inspection Technology for Safe and Reliable Railway Traffic / T. Hisa, M. Kanaya, M. Sakai, K. Hamaoka // Hitachi Review. – 2012. – Vol. 61, № 7. – P. 325–330.
15. Thompson, D. Railway noise and vibration: the use of appropriate models to solve practical problems / D. Thompson // 21st Intern. Congress on Sound and Vibration (13.07–17.07. 2014). – Beijing, China. – 2014. – P. 1–16.
16. Using the PiP Model for Fast Calculation of Vibration from a Railway Tunnel in a Multi-layered Half-Space / M. F. M. Hussein, H. E. M. Hunt, L. Rikse [et al.] // Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. – 2008. – Vol. 99. – P. 136–142. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9\_19.

И. А. БОНДАРЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-30

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАТИВНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

**Цель.** В исследовании главной целью является определение особенности деформационной работы железнодорожного пути за счет установления границ устойчивости рельсового пути, в зависимости от конструкции и состояния систем верхнего и нижнего строений пути, плана линии для возможности формирования нормативной базы по надежности и функциональной безопасности железнодорожного пути Украины. **Методика.** Для достижения цели использована полная методика С. П. Першина по определению критических значений сжимающей силы. **Результаты.** Автором установлено, что соотношения минимальных значений сжимающей силы при определенных деформациях изгиба могут быть применены как оценочные условия деформационной устойчивости пути и основы для формирования базы по надежности и функциональной безопасности железнодорожного пути Украины. **Научная новизна.** Предложены теоретические положения для рассмотрения деформационной устойчивости системы конструкций верхнего и нижнего строений пути. Это позволит исследовать процесс деформационной работы указанной системы, при котором происходят изменения ее состояний в течение некоторой наработки. Так что, это позволит определить параметры функциональной надежности движения поездов как составляющей безопасности пропуска подвижного состава по участку пути с учетом его технического состояния. **Практическая значимость.** Обычно для безопасного пропуска подвижного состава определяются параметры процесса колебаний системы «экипаж – путь». Эти параметры нормированы инструкциями по устройству и содержанию рельсового пути. Изменения нормативной базы железнодорожного транспорта за последние годы предусматривают соблюдение его функциональной безопасности, которые в существующих нормативах железнодорожного пути не учтены. Поэтому необходимо вопрос об оценке влияния воздействия подвижного состава на путь рассматривать как динамический процесс, критерии предельных состояний которого обусловлены на основании существующих нормативов, соотнесенных с состояниями надежности, а на их основе разработать критерии по безопасности в течение всего жизненного цикла. При рассмотрении динамического процесса колебания пути и подвижного состава необходимо учитывать деформативную устойчивость пути. Этот вопрос рассматривался только с точки зрения изменения температурных деформаций. Данное исследование предоставляет основы, при которых можно учитывать и жесткостные деформации для возможности формирования нормативной базы по надежности и функциональной безопасности железнодорожного пути Украины.

*Ключевые слова:* деформативная работа пути; устойчивость пути; надежность пути

I. O. BONDARENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 42, e-mail irina\_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-30

## FEATURES OF THE DEFORMATION WORK OF THE RAILWAY TRACK

**Purpose.** The purpose of study is to identify the features of the railway track work deformation by establishing the boundaries of the track sustainability depending on the design and condition of systems of the upper and lower track structure, plan of a line for the possibility of forming a regulatory framework for reliability and functional safety of railway track in Ukraine. **Methodology.** The complete method of S. P. Pershyn of determination the critical values of compressive strength was used for the achievement of the purpose. **Findings.** The author found that the ratio of the minimum values of compressive force under the certain bending deformation can be used as evaluation conditions of the track deformation resistance and basis for formation the base of reliability and functional safety of the Ukrainian

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

railway track. **Originality.** The theoretical position for the consideration the deformation stability of the upper and lower track structure were proposed. It will allow studying the process of deformation work of the system, which changes its state during a particular operating time. Thus, it allows determining the parameters of the functional reliability of the train as a part of security pass of the rolling stock on the track, accounting its technical condition.

**Practical value.** Usually for the safe passage of rolling stock the parameters of the oscillations of the «vehicle – track» are determined. These parameters are normalized with the instructions on design and maintenance of the railway track. Changes in the regulatory framework of rail transport in recent years provide the observance of its functional safety that are not included in the existing regulations of the railway track. Therefore it is necessary the issue of effect impact assessment of the rolling stock on the track to consider as a dynamic process, limit states criteria of which are determined on the basis of existing norms, correlated with the reliability states, and to develop criteria for security throughout the life cycle on their basis. At considering the dynamic process of track oscillation and rolling stock must take into account the deformation resistance of the track. This issue was addressed only in terms of changes in temperature deformations. This study provides a basis at which it is possible to take into account the stiffness of deformation for the ability of regulatory framework formation for reliability and functional safety of railway track in Ukraine.

*Keywords:* track deformation work; track sustainability; track reliability

## REFERENCES

1. Alizhan A., Adilkhanov Ye.G. Issledovaniye vliyaniya volnoobraznykh nerovnostey poverkhnosti kacheniya relsov na dinamiku relsovykh ekipazhey [Research of wave-like irregularities influence on the rolling surface of rails for rail vehicles dynamics]. *Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsii im. M. Tynyshepayeva* [Bulletin of Kazakhstan Transport and Communications Academy named after M. Tynyshepayev], 2008, no. 6, pp. 80-86.
2. Verichev S.N. Matematicheskiye metody issledovaniya ustoychivosti obekta, dvizhushchegosya po uprugoy napravlyayushchey [Mathematical methods of research the stability of an object moving along the elastic guide]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Bulletin of Lobachevsky State University of Nizny Novgorod], 2008, no. 4, pp. 117-121.
3. Bondarenko I.O., Kurhan D.M., Patlasov O.M., Savluk V.Ye. Vykorystannia tsyfrovoy vymiriuvainoi tekhniki dlia eksperymentalnykh doslidzhen vzaємodii kolii i rukhomoho skladu [Using of digital instrumentation equipment for experimental researches of track and rolling stock interaction]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 124-128.
4. Kasimov B.R. Metodika prognozirovaniya sostoyaniya putevoy bezopasnosti [Methods of predicting the state of the track safety]. *Promyshlennyy transport Kazakhstana – Industrial Transport of Kazakhstan*, 2014, no. 1, pp 19-23.
5. Kornilov S.N., Abdukamilov Sh.Sh. Rezultaty eksperimentalnogo izucheniya prochnostnykh kharakteristik barkhannykh peskov, slagayushchikh zheleznodorozhnoye zemlyanoye polotno [The results of experimental study of the strength characteristics of dune sands composing the railway roadbed]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, issue 1, pp. 105-110.
6. Suvorova T.V., Usoshin S.A. K raschetu volnovogo polya, vzbuzhdayemogo vstrechnymi ostsilliruyushchimi nagruzkami v geterogennom poluprostranstve [To the calculation of the wave field excited by an oscillating counter-pressure loads in heterogeneous half-space]. *Transport–2011: trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport–2011: Proc. of All-Russian Scientific and Practical Conf.]. Moscow, 2011, p. 1, pp. 17-19.
7. Schulte-Werning B., Asmussen B., Behr W., Degen K.G., Garburg R. Advancements in Noise and Vibration Abatement to Support the Noise Reduction Strategy of Deutsche Bahn. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, 2012, vol. 118, pp. 9-16. doi: 10.1007/978-4-431-53927-8\_2.
8. Auersch L. The Influence of the Soil on Track Dynamics and Ground-Borne Vibration. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, 2008, vol. 99, pp. 122-128. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9\_17.
9. Ling X.-Zh., Chen S.-J., Zhu Zh.-Y., Zhang F., Wang L.-N., Zou Z.-Y. Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai–Tibet railway in China. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, vol. 60, issue 1, pp. 75-83. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.08.005.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

10. Lombaert G., Degrande G., Francois S., Thompson D.J. Ground-Borne Vibration due to Railway Traffic: A Review of Excitation Mechanisms, Prediction Methods and Mitigation Measures. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, 2008, vol. 126, pp. 253-287. doi: 10.1007/978-3-662-44832-8\_33.
11. Lakušić S., Ahac M. Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas. *Technical Gazette*, 2012, vol. 19, issue 2, pp. 427-435.
12. Lee B., Chau W., Lam J., Yeung M. Planning and Controlling Railway Noise in a Metropolis: Our Practical Experience. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, 2012, vol. 118, pp. 17-23. doi: 10.1007/978-4-431-53927-8\_3.
13. Avillez J., Frost M., Cawser S., Skinner C., El-Hamalawi A., Shields P. Procedures for estimating environmental impact from railway induced vibration: a review. ASME Proc. Noise Control And Acoustic Division Conference at InterNoise 2012 (19.08.–22.08. 2012). New York, 2012, pp. 381-392. doi: 10.1115/ncad2012-1083.
14. Hisa T., Kanaya M., Sakai M., Hamaoka K. Rail and Contact Line Inspection. Technology for Safe and Reliable Railway Traffic. *Hitachi Review*, 2012, vol. 61, no. 7, pp. 325-330.
15. Thompson D. Railway noise and vibration: the use of appropriate models to solve practical problems. 21st Intern. Congress on Sound and Vibration (13.07–17.07. 2014), Beijing, China, 2014, pp. 1-16.
16. Hussein M.F.M., Hunt H.E.M., Rikse L., Gupta S., Degrande G., Talbot J.P., François S., Schevenels M. Using the PiP Model for Fast Calculation of Vibration from a Railway Tunnel in a Multi-layered Half-Space. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, 2008, vol. 99, pp. 136-142. doi: 10.1007/978-3-540-74893-9\_19.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. Д. В. Лаухіним (Україна)*

Надійшла до редколегії 18.07.2015

Прийнята до друку 21.09.2015