

УДК 625.14"401.4":[539.372:536.722]

Д. М. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

МОДЕЛЮВАННЯ НАКОПИЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ НА ОСНОВІ ЕНТРОПІЇ СИСТЕМИ

Мета. В роботі передбачається проведення теоретичних досліджень щодо використання методів, які визначають термін експлуатації залізничної колії не тільки за показником загального обсягу навантаження, а й враховують його структуру та динамічні характеристики. Метою таких досліджень є створення моделі накопичення деформацій для оцінки термінів експлуатації залізничної колії із урахуванням зазначених особливостей. **Методика.** Для моделювання процесу поступової зміни стану за час експлуатації (накопичення деформацій) залізнична колія представлена як система, яка складається з множин часток різних речовин, зібраних у цільну конструкцію. Доцільно говорити не про появу деформацій якоїсь визначеної величини в певному перерізі колії, а про імовірність такої події на ділянці. Якщо оперувати вірогідністю появи відхилення, стан системи зручно характеризувати кількістю розривів умовних внутрішніх зв'язків. Однаковому стану системи можуть відповідати різні комбінації розривів. Чим більша кількість розривів, тим більша кількість варіантів змін структури системи, що відповідають її поточному стану. Такий процес можна представити як поступовий перехід від упорядкованого стану до хаотичного. Для опису наведеної характеристики системи застосовується такий чисельний показник, як ентропія. **Результати.** При старінні системи її ентропія постійно збільшується. Зростання ентропії виражається змінами внутрішньої енергії системи, які можна визначити, використовуючи механічну роботу сил, дія яких приводить до деформацій. Це дає змогу визначити кількісний показник розриву зв'язків у системі як наслідок виконання механічної роботи. За результатами теоретичних досліджень розроблено методику оцінки строків життєвого циклу експлуатації залізничної колії із урахуванням таких факторів, як: структура поїздопотуку, конструкція верхньої будови колії, рух поїздів із високими швидкостями. **Наукова новизна.** Вперше для моделювання накопичення деформацій залізничної колії використаний такий показник, як ентропія системи. **Практична значимість.** Розгорнуті аналітичні залежності доведено до практичної методики, що дає змогу аналізувати ділянки колії із різними конструкціями або з різними умовами експлуатації за строками накопичення деформацій.

Ключові слова: ентропія; верхня будова колії; залишкові деформації; розрахунок колії на міцність; напруження в колії; строк служби колії

Вступ

Стала тенденція розвитку транспортних мереж потребує від залізничного транспорту підтримувати та удосконалювати сучасний стан для збереження конкурентоспроможності. Одним з основних показників вибору виду транспорту традиційно залишається швидкість доставки вантажів і пасажирів [15]. Для забезпечення цієї умови залізнична колія повинна весь час експлуатації знаходитись у належному стані [14]. Серед багатьох суміжних питань постає завдання щодо прогнозування термінів експлуатації залізничної колії.

Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях

України (ЦП-0287) [11] визначає основні та додаткові показники, від яких залежать строки виконання відповідних ремонтних робіт. Але введення швидкісного руху, перерозподіл потоків поїздів з метою спеціалізації вантажних і пасажирських напрямків [5] потребують доповнень до такого основного критерію призначення модернізації, як пропущений тоннаж. Такі корегування повинні враховувати структуру поїздопотуку, що обертається на ділянці, та швидкості руху поїздів.

Мета

В цій роботі передбачається виконання теоретичних досліджень щодо використання методів, які визначають термін експлуатації заліз-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ничної колії не тільки за показником загального обсягу навантаження, а й враховують його структуру та динамічні характеристики. Метою таких досліджень є створення моделі накопичення деформацій для оцінки термінів експлуатації залізничної колії з урахуванням зазначених особливостей.

Методика

Для моделювання процесу поступової зміни стану залізниці за час експлуатації залізничну колію можна представити як систему, яка складається з множини часток різних речовин, зібраних в суцільну конструкцію. Кожна частка оточена пружними зв'язками з іншими, які формують навколо неї щось на зразок пружної оболонки або сукупності зв'язків. При навантаженні системи ця сукупність деформується, а за певних обставин деякі зв'язки руйнуються, що зумовлює перехід від пружних деформацій до залишкових.

Життєвий цикл такої системи можна розглядати як процес накопичення розірваних зв'язків. Якщо кількість розривів доходить до кількості елементарних часток, то відбувається повний розпад системи. Зазвичай приймається, що тіло, яке опрацьовує навантаження, в процесі експлуатації проходить три етапи розвитку, які характеризуються різними швидкостями накопичення деформацій: на першому етапі швидкість накопичення деформацій зменшується, на другому – залишається приблизно постійною, на третьому – збільшується. Наочно це можна продемонструвати графіком на рис. 1. Його прототип було наведено у роботі [4] як приклад деформації ґрунту під навантаженням, але якісно він підходить для більшості твердих тіл та їх систем.

Наприклад, в роботі [10] наведено результати розрахунків для залишкових деформацій залізничної колії в вертикальній площині, які якісно відповідають зонам «1» і «2» графіка, зображеного на рис. 1. Також відповідні за характером залежності були отримані в роботах [16, 17], присвячених застосуванню в колії геоматеріалів, які включали розгорнуті дослідження щодо накопичення деформацій підрейкової основи від циклічного навантаження, отримані як експериментально, так і з виконанням математичного моделювання.

Перехід у зону «3» (див. рис. 1), а можливо навіть наближення до завершення зони «2», враховуючи специфіку саме системи «залізнична колія», не є доцільним. Термін експлуатації залізничної колії не може визначатися до її повного руйнування – весь час повинна забезпечуватися умова безпечного пропуску поїздів з встановленими швидкостями руху. З іншого боку, відмова якогось з елементів або порушення геометричного положення колії в певних межах [14] не обов'язково є приводом для виконання позапланових ремонтних робіт або обмеження швидкості руху. Враховуючи велику протяжність залізничних ділянок, для теоретичних розрахунків (тобто для прогнозування) доцільно говорити навіть не про виникнення деформацій якоїсь визначеної величини в певному перерізі колії, а про ймовірність такої події на ділянці. Рішення стосовно доцільності усунення окремих порушень (поточне утримання колії) або виконання проміжних ремонтів, або повної заміни верхньої будови колії повинно прийматися саме із врахуванням швидкості накопичення (розвитку) відхилень. Таким чином, визначення граничного стану залізничної колії є не тільки технічною, а й економічною задачею.

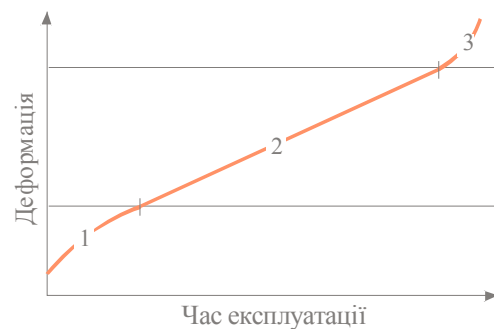


Рис. 1. Залежність деформації тіла від часу експлуатації:

- 1 – швидкість деформації зменшується;
- 2 – швидкість деформації приблизно постійна;
- 3 – швидкість деформації збільшується

Fig. 1. Dependence of body deformation from the operational time:

- 1 – rate of deformation decreases;
- 2 – approximately constant rate of deformation;
- 3 – rate of deformation increases

Якщо оперувати вірогідністю появи певних відхилень, то зручно стан системи (ступінь її старіння) характеризувати кількістю умовних розривів внутрішніх зв'язків для питомої про-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

тяжності. Однаковому стану системи можуть відповідати різні комбінації розривів. Зрозуміло, що чим більше кількість розривів, тим більше існує варіантів змін структури системи, що відповідають її однаковому стану. Опису наведеної характеристики відповідає такий числовий показник як ентропія. В загальному вигляді ентропія системи визначається за формулою

$$S = k \ln W, \quad (1)$$

де k – постійна Больцмана; W – кількість можливих мікроскопічних станів у наявному макроскопічному стані.

Спочатку ентропія застосовувалась в термодинаміці, але виявилось, що запропоновані наукові підходи є доволі універсальними. На сьогодні поняття ентропії використовується в хімії, біології, інформатиці і багатьох напрямках фізики. Як правило, ентропія адекватно описує розвиток (старіння) більшості систем, для яких цей процес можна подати як поступовий перехід від упорядкованого стану до хаотичного. Як приклади застосування ентропії для опису термінів експлуатації твердих тіл та їх систем можна вказати такі роботи: [1, 4, 9, 12, 13, 18–20].

Так в роботі [19] наведено модель накопичення пошкоджень у плямі з'єднання твердих пластичних тіл при відсутності детальної мікроструктурної інформації на основі принципу максимуму ентропії. В роботі [18] описується практичний метод для визначення топологічних фаз стану матеріалу в довільних моделях за рахунок точного розрахунку ентропії за допомогою матриці щільності. В роботі [20] обґрунтовано підпорядкованість розвитку системи ентропії, як аналогу законів термодинаміки, які є універсальними і розповсюджуються на інші напрямки фізики. Коновалов А. А. в роботі [4] показує можливість застосування принципів ентропії у різних галузях, в тому числі демонструє зв'язок ентропії з механічними деформаціями матеріалів, висловлює міркування щодо залежності граничних значень ентропії відносно співвідношення швидкостей розповсюдження в речовині поздовжніх та поперечних хвиль. Гіляров В. Л. в роботі [1] розкриває кінетичну концепцію міцності матеріалів як хід еволюції, що зумовлена ентропією. В роботі [12] наведено математичну побудову методики розрахунку довговічності роботи речовин на основі ентро-

пійного критерію з числовими прикладами. В роботі [13] розглянуто довговічність твердих тіл під навантаженням, обґрунтовано визначення термінів їх руйнування, виходячи з показників ентропії, в тому числі для пояснення положень кінетичної теорії міцності. Куриленко Г. А. в роботі [9] посилається на поняття ентропії для розробки методу прогнозування циклічної довговічності деталей з наявністю тріщин. Деякі положення, наведені в зазначених публікаціях, було використано для виконання досліджень в рамках цієї роботи.

Під час старіння системи її ентропія постійно збільшується. В первинній постановці задачі зміна ентропії визначається як відношення кількості теплоти (δQ), отриманої або втраченої системою, до величини абсолютної температури (T):

$$\Delta S = \delta Q / T. \quad (2)$$

Показник теплоти, яка оброблена системою, не обов'язково є наслідком безпосередньо її нагріву (охолодження). Всі механічні процеси, у тому числі деформації, супроводжуються виділенням тепла, перш за все як результат роботи сил тертя, включаючи й внутрішнє тертя. Окрім миттєвого руйнування твердих тіл, що є наслідком виникнення напружень за межами міцності, поступове руйнування (накопичення деформацій) відбувається при загальних навантаженнях значно менших за межі міцності. За рахунок гетерогенності будови реальних тіл і інших факторів (для залізничної колії до таких факторів перш за все треба віднести наявність відступів в утриманні, навіть в межах допусків) зовнішнє навантаження розподіляється нерівномірно, що призводить до виникнення локальних перенапружень. Саме в таких місцях будуть відбуватися процеси розриву напружених зв'язків температурними флуктаціями, що призведе до формування зон розвитку деформацій [13].

Безпосередні дослідження руйнування твердих тіл на рівні структури речовини та перетворень пружних і пластичних деформацій до теплової і інших видів енергії не передбачені в межах цієї роботи. Для вирішення поставленої задачі достатньо визначитись щодо зміни внутрішньої енергії системи за загальновідомим рівнянням:

$$dU = \delta Q - \delta A + \mu dN, \quad (3)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

де δA – робота системи проти дії зовнішніх сил; μdN – зовнішнє додавання речовини у кількості N з потенціалом μ .

Якщо говорити про систему «залізнична колія», то природно розглядати проходження по перерізу колії однієї колісної пари як один такт зміни енергії. Тоді весь життєвий цикл буде складатися з кількості таких тактів.

Слід звернути увагу, що у формулі (3) dU – це зміна енергії (повний диференціал), а δQ і δA – це елементарні (найменші) порції відповідних величин. Тому не зовсім вірно значення останніх ототожнювати з одним тактом. Доцільно переписати рівняння (3) у диференційному вигляді

$$\dot{U} = \dot{Q} - \dot{A}, \quad (4)$$

де точка позначає першу похідну по часу; прийнято, що $\mu dN = const$.

Тоді, враховуючи формули (2) і (4), збільшення ентропії системи за час проходження однієї колісної пари можна визначити за формулою

$$\Delta S = \frac{1}{T} \int_0^t (\dot{U} + \dot{A}) dt. \quad (5)$$

Це дає змогу навести кількісний показник розриву зв'язків у системі (її старіння) як наслідок виконання механічної роботи

$$W = e^{\frac{S_0}{k} + \frac{n}{kT} \int_0^t (\dot{U} + \dot{A}) dt}, \quad (6)$$

де S_0 – початкова ентропія системи (наявна до початку експлуатації); n – кількість пропущених колісних пар (тактів).

Методика розрахунку інтегралу у формулі (6), перш за все, залежить від інструментів щодо визначення роботи системи. В загальному вигляді робота є скалярним добутком сили на вектор переміщення тіла або системи від дії цієї сили

$$A = \int \vec{F} d\vec{s}. \quad (7)$$

У системі залізничної колії сила, що діє від колеса на рейку, призводить до вигину рейки і стискання шарів підрейкової основи, які мають різні фізичні властивості. Поява напружень і деформацій відбувається не тільки по осі прикладання сили, а має трьохвимірний характер із складними законами розподілу в просторі, що

залежать від багатьох факторів. Навіть для дослідження певного перерізу колії слід враховувати, що прогин в ньому починається ще під час знаходження колеса на деякій відстані. Як правило (за виключенням високих швидкостей руху), колесо завжди знаходиться у зоні вже майже реалізованих деформацій [8].

Визначення роботи сил, спрямованих на деформацію залізничної колії, є складною задачею, детального розв'язання якої, напевно, можна досягнути тільки з застосуванням сучасних математичних моделей. З іншого боку, для вирішення задач 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 пропонується під роботою залізничної колії мати на увазі роботу сил, що діють від рейки на опору, і призводить до вертикальної деформації підрейкової основи в перерізі колісної пари.

Розглянемо декілька варіантів. Для переходу від теоретичних передумов до практичної методики розрахунків будемо намагатися замінювати показники, що наразі не порівнюються, числовими значеннями, приймаючи їх відповідно до типових умов експлуатації.

Перший варіант. Роботу від проходження колісної пари можна розрахувати як добуток сили, що діє від рейки на підрейкову основу (Q), на прогин від дії цієї сили (z)

$$A = 2Qz. \quad (8)$$

Прогин рейки як балки, що лежить на рівнопружній основі, визначається за формулою

$$z = Pk/2U, \quad (9)$$

де P – сила, що діє на рейку з урахуванням динамічних добавок; U – модуль пружності підрейкової основи; k – коефіцієнт відносної жорсткості.

Сила, що діє від рейки на опору:

$$Q = \frac{kl}{2} P, \quad (10)$$

де l – відстань між осями підрейкових опор (шпал).

У першому наближенні сила дії від колеса на рейку може бути виражена через масу коліс-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ної пари. Тоді для практичного розрахунку роботи

$$A = 3,6 \cdot 10^{-4} q^2, \quad (11)$$

де q – навантаження на вісь, т. Значення коефіцієнта, крім іншого, враховує, що результат роботи буде отримано в кН·м.

Навіть такий спрощений підхід вже дає змогу порівняти дію на колію різних потоків поїздів.

Другий варіант. Як розрахункову залишаємо формулу (8). Сила і прогин, які входять до неї, більш точно можуть бути визначені за розрахунками колії на міцність [2, 3]. Це дає змогу врахувати швидкості руху поїздів і деякі характеристики конструкції та стану ділянки колії.

Схожий підхід було використано в роботі [6] для вирішення задачі визначення впливу стану залізничної ділянки і структури поїздопотоків на життєвий цикл колії.

Третій варіант. Робота сил системи може бути визначена як сума робіт її складових частин

$$A = \sum A_i. \quad (12)$$

Розрахунки колії на міцність [2, 3] дають змогу визначати тиск на окремі шари залізничної колії. Тоді для обчислення роботи треба визначати об'ємні розширення шарів від тиску на них. Це потребує виконання досить складних розрахунків з залученням низки додаткових вихідних даних щодо фізичних і геометричних характеристик. Такий підхід суттєво виходить за рамки інженерного розрахунку колії на міцність. Тому пропонується обмежитись визначенням вертикальної деформації шару будови колії, наприклад, за формулою Шлейхера-Бусінеску

$$z = w\sigma\sqrt{\Omega}(1-\mu^2)/E, \quad (13)$$

де σ – напруження на поверхні шару площиною Ω ; E – модуль пружності шару; μ – коефіцієнт Пуассона; w – поправочний коефіцієнт.

Спираючись на формулу (13), під час виконання практичних розрахунків для більшості випадків отримано наступну залежність роботи від напружень

$$A = (0,67\sigma_{ш} + 4,96\sigma_6 + 45,7\sigma_{зп})Q \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

де $\sigma_{ш}$, σ_6 , $\sigma_{зп}$ – напруження на поверхні шпал під підкладкою, на поверхні баласту під шпалою, на основній площадці земляного полотна відповідно в МПа за умови отримання роботи у кН·м.

Такий підхід порівняно з попередніми додає можливість враховувати конструкцію колії. Це дає змогу вирішувати не тільки задачі порівняння різних потоків поїздів, а й враховувати варіанти конструкції залізничної колії.

Четвертий варіант. Усі розглянуті методи визначення роботи сил системи базуються на статичній залежності деформації від сили. В основу розрахунків колії на міцність [3] також покладено припущення миттєвості виникнення в залізничній колії напружень і деформацій, що урівноважують дію прикладеної сили. Для таких випадків інтеграл у формулі (6) вироджується. Для звичайних швидкостей руху такого підходу достатньо. Виключення складе рух поїздів з високими швидкостями, при яких виникає необхідність враховувати динаміку прогину підрейкової основи [8]. Тоді робота буде визначатися через тензор напружень і деформацій

$$\dot{A} = \sum \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}. \quad (15)$$

Для таких розрахунків потрібно залучення відповідних фізико-математичних моделей залізничної колії. Наприклад, модель напружено-деформованого стану залізничної колії на основі хвильової теорії розповсюдження напружень [7, 8].

Виконання числових розрахунків безпосередньо за формулою (6) майже унеможливується збігом великого значення кількості колісних пар – у еквівалентні 800 млн т пропущеного тоннажу n залежно від навантаження на вісь дорівнює декільком мільйонам, та маленького значення постійної Больцмана – $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, що відповідає розриву зв'язку на рівні атомів. Така деталізація зайва. Пропонується оцінювати старіння системи у відсотках, прийнявши, що 100 % відповідають такому стану залізничної колії, коли потрібно виконувати заміну верхньої будови колії (модернізацію або капітальний ремонт [11]).

Тоді, з урахуванням переходу до зручних одиниць виміру, формула (6) набуває вигляду

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$\tilde{W} = 100 \left(e^{bn \int_0^t (U_0 + \dot{A}) dt} - 1 \right), \quad (16)$$

де n – кількість мільйонів пропущених колісних пар; b , U_0 – параметри, значення яких було визначено емпірично за опрацюванням складу поїздопотоків на магістральних напрямках України. Враховуючи те, що потік поїздів на ділянці буде складатися з різних категорій, формула (16) набуває вигляду

$$\tilde{W} = 100 \left(e^{0,066 \sum n_k (0,116 + A_k)} - 1 \right), \quad (17)$$

де n_k – кількість мільйонів пропущених колісних пар для k -ї категорії поїздів; A_k – робота,

яку виконує залізнична колія при проходженні колісної пари k -ї категорії поїзда.

Кількість колісних пар можна визначити за формулою

$$n_k = \frac{365 \cdot 10^{-6} N_k Q_k T_p}{q_k}, \quad (18)$$

де N_k , q_k , Q_k – кількість за добу, навантаження на вісь і маса відповідно у тоннах поїздів k -ї категорії; T_p – час експлуатації ділянки в роках.

Результати

Для можливості практичного застосування запропоновані вище формули з прийнятими числовими коефіцієнтами зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові формули оцінки строків накопичення деформацій залізничної колії

Table 1

The calculation formulas of estimating the accumulation of deformations of railroad tracks

Варіант	Розрахункові формули		Фактори, що враховано	Примітка
	Робота колії від проходження колісної пари A , кН·м	Вичерпання ресурсу залізничної колії \tilde{W} , %		
A	$A = 3,6 \cdot 10^{-4} q^2$	$\tilde{W} = 100 \left(e^{0,066 \sum n_k (0,116 + A_k)} - 1 \right),$	Осьове навантаження	Потрібно виконання розрахунків колії на міцність
B	$A = 2Qz$	$n_k = \frac{365 \cdot 10^{-6} N_k Q_k T_p}{q_k}$	Структура (маса, кількість та швидкість) потоку поїздів	
C	$A = (0,67\sigma_{ш} + 4,96\sigma_6 + 45,7\sigma_{шн}) \times Q \cdot 10^{-3}$		Структура потоку поїздів, конструкційний склад колії	
D	$\dot{A} = \sum \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$	$\tilde{W} = 100 \left(e^{0,066 \sum n_k \int_0^t (0,116 + \dot{A}_k) dt} - 1 \right)$	Детальне врахування конструкції колії, високі швидкості руху	Потрібно використання моделі залізничної колії, що враховує динаміку прогину підрейкової основи

Результатом наведених розрахунків буде вичерпання ресурсу залізничної колії на розрахунковий час, виражене у відсотках. При переході до формули з визначеними числовими параметрами (ф. (17)) за 100 % прийнято строк,

який відповідає пропуску 800 млн т бруто на ділянці, яка за вантажонапруженістю відноситься до I-ї категорії [11]. Прийнято, що весь час експлуатації стан колії відповідає встановленим нормам [14], у тому числі не потребує

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

обмежень швидкості руху, що досягається своєчасним виконанням робіт з поточного утримання та проміжних ремонтів. Тому порівнюючи варіанти, які в однаковий строк експлуатації, встановлений за пропущеним тоннажем, мають за наведеною методикою різну оцінку, перш за все можна робити висновок щодо різниці у витратах, які вони будуть потребувати на поточне утримання.

Для детального врахування впливу на життєвий цикл залізничної колії витрат на роботи в міжремонтний термін запропонована методика може бути розширена відмовленням від припущення, що $\mu dN = const$, яке було прийнято для формули (3). Тоді через цей вираз буде враховано відновлення системи через залучення зовнішньої дії (виправлення геометрії) або введення до неї нових частин речовини (часткова заміна елементів верхньої будови колії, що вийшли з ладу).

Розглянемо числовий приклад. Прийємо такий потік поїздів за добу: 30 пасажирських масою 1000 т з навантаженням 15 т/вісь, 40 вантажних масою 4000 т з навантаженням 21,5 т/вісь. Така ділянка буде відноситись до I-ї категорії [11] – вантажонапруженість складе приблизно 70 млн т км брутто на км за рік. Відповідно до положення про виконання планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт [11] строк експлуатації ділянки (між модернізаціями) буде призначено після пропуску 800 млн т брутто, що, відповідно до вантажонапруженості, відбудеться через 11,5 років.

Розрахунки щодо оцінки строків експлуатації залізничної ділянки виконано для декількох варіантів вихідних даних, які наведено у табл. 2.

Результати розрахунків у вигляді залежності вичерпання ресурсу від часу експлуатації, який може бути виражений через роки або пропущений тоннаж, зображено на рис. 2.

Виходячи з аналізу результатів, наведених на рис. 2, можна порівняти вплив на процес накопичення деформацій характеристик поїздопоток (показано на прикладі різних швидкостей руху – варіанти розрахунків «2» і «3») та параметрів конструкції колії (показано на прикладі різної товщини баластного шару – варіанти розрахунків «4» і «5»). Ще раз підкреслимо, що різницю у строках отримано за умови однакового міжремонтного утримання ділянки

у всіх розглянутих випадках. Тому для практичного використання доцільно говорити про тотожний висновок – зміну у витратах на міжремонтне утримання при призначенні модернізації у однаковий термін за пропущеним тоннажем.

Таблиця 2

Варіанти розрахунків

Table 2

Variants of calculations

Номер розрахунку	Варіант розрахункових формул	Змінні параметри
1	А	
2	В	$V_{\text{пас}} = 120$ км/год; $V_{\text{вант}} = 40$ км/год
3		$V_{\text{пас}} = 160$ км/год; $V_{\text{вант}} = 80$ км/год
4	С	$V_{\text{пас}} = 160$ км/год; $V_{\text{вант}} = 80$ км/год; $h_6 = 60$ см
5		$V_{\text{пас}} = 160$ км/год; $V_{\text{вант}} = 80$ км/год; $h_6 = 40$ см

Примітка. $V_{\text{пас}}$, $V_{\text{вант}}$ – швидкості руху пасажирських і вантажних поїздів відповідно; h_6 – товщина баластного шару.

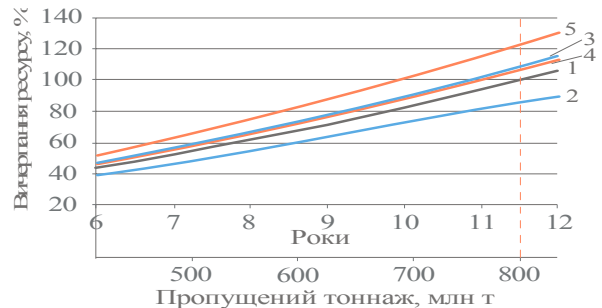


Рис. 2. Вичерпання ресурсу залежно від часу експлуатації: 1–5 – номери розрахунків за табл. 2.

Fig. 2. Exhaustion of resources based on operational time: 1–5 – numbers of settlements on the table 2.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше для моделювання накопичення деформацій залізничної колії використано такий показник, як ентропія системи. Це дало змогу розробити методику оцінки строків життєвого циклу експлуатації залізничної колії з урахуванням таких факторів, як структура поїздопотоків, конструкція верхньої будови колії, рух поїздів з високими швидкостями.

Висновки

Виконано теоретичні дослідження та отримано аналітичну методику для моделювання процесу накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи. Використання ентропії дало змогу навести старіння залізничної колії в міжремонтний період як випадковий процес накопичення деформацій в результаті реакції на зовнішнє навантаження, виражене через показники механічної роботи.

Термін служби залізничної колії залежить не тільки безпосередньо від пропущеного вантажу, а й від динамічного характеру навантаження та пружно-жорсткісних показників залізничної колії. Врахування таких показників дає змогу порівнювати варіанти з різними параметрами поїздопотоків, різними встановленими швидкостями руху, характеристиками конструкції колії тощо.

Розгорнуті аналітичні залежності доведено до практичної методики, що дає змогу виконувати порівняння варіантів, обмежуючи розрахунки до залежностей, необхідних для врахування параметрів, за якими вони відрізняються.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гиляров, В. Л. Кинетическая концепция прочности и самоорганизованная критичность в процессе разрушения материалов / В. Л. Гиляров // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – Вып. 5. – С. 808–811.
2. Даніленко, Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
3. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 /
4. Коновалов, А. А. Энтропия, деформация, теплоемкость и жизненный цикл [Электронный ресурс] / А. А. Коновалов. – Режим доступа: <http://trinitas.ru/rus/doc/0016/001c/1840-kon.pdf>. – 2012. – Назва з екрана. – Переверено : 12.06.2015.
5. 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.
6. 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. 67–77.
7. Курган, Д. Н. Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений / Д. Н. Курган, И. О. Бондаренко // Problemy Kolejnictwa. – 2013. – Вып. 159. – С. 99–111.
8. Курган, Д. М. Особливості сприйняття навантаження елементами залізничної колії при високих швидкостях руху / Д. М. Курган // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 2 (56). – С. 136–145. doi: 10.15802/stp2015/42172.
9. Куриленко, Г. А. Прогнозирование циклического ресурса деталей с макротрещинами термографическим методом / Г. А. Куриленко // Изв. Томск. техн. ун-та. – 2012. – Т. 321, № 2. – С. 36–39.
10. Научные основы моделирования взаимодействия пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации / М. М. Железнов, В. О. Певзнер, В. П. Соловьев, С. С. Надежин // Бюллетень ОУС ОАО РЖД. – 2014. – № 4. – С. 2–29.
11. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП-0287 / А. Бабенко, Г. Линник, К. Мойсеєнко [та ін.]. – Київ, 2015. – 45 с.
12. Расчёт долговечности упруго-наследственных сред при длительном циклическом нагружении / В. И. Дырда, С. П. Сокол, Е. В. Калганков [и др.] // Геотехнічна механіка. – 2013. – № 108. – С. 111–122.
13. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский // Успехи физ. наук. – 1972. – Т. 106. – Вип. 2. – С. 193–228.
14. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0267 / О. М. Патласов, В. В. Рибкін, Ю. В. Палейчук [та ін.]. – Київ, 2012. – 25 с.
15. Транспортна стратегія України на період до 2020 року [Електронний ресурс] : затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовт. 2010 р. № 2174-р. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80>. – Назва з екрана. – Перевірено : 12.06.2015.
 16. Fischer, S. Superstructure Stabilization of Ballast Bedded Railway Tracks with Geogrids / S. Fischer, F. Horvát // Hungarian J. of Industry and Chemistry. – 2011. – Vol. 39, № 1. – P. 101–106.
 17. Horvát, F. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests / F. Horvát, S. Fischer, Z. Major // Acta Technica Jaurinensis. – 2013. – Vol. 6, № 2. – P. 21–44.
 18. Jiang, H. C. Identifying topological order by entanglement entropy / H. C. Jiang, Z. Wang, L. Balents // Nature Physics. – 2012. – Vol. 8. – Iss. 12. – P. 902–905. doi: 10.1038/nphys2465.
 19. Maximum entropy fracture model and its use for predicting cyclic hysteresis in Sn₃. 8Ag₀. 7Cu and Sn₃. 0Ag₀. 5 solder alloys / J. P. Tucker, D. K. Chan, G. Subbarayan, C. A. Handwerker // Microelectronics Reliability. – 2014. – Vol. 54 (11). – P. 2513–2522. doi: 10.1016/j.microrel.2014.04.012 .
 20. Thermodynamical property of entanglement entropy for excited states. / J. Bhattacharya, M. Nozaki, T. Takayanagi, T. Ugajin // Physical review letters. – 2013. – Vol. 110. – Iss. 9. – P. 091602. doi: 10.1103/PhysRevLett.110.091602.

Д. Н. КУРГАН^{1*}

^{1*}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 kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА ОСНОВЕ ЭНТРОПИИ СИСТЕМЫ

Цель. В работе предусмотрено проведение теоретических исследований возможности использования методов, которые определяют срок эксплуатации железнодорожного пути не только по показателям общего объема нагрузок, а и учитывают его структуру и динамические характеристики. Цель таких исследований – создание модели накопления деформаций для оценки сроков эксплуатации железнодорожного пути с учетом указанных особенностей. **Методика.** Для моделирования процесса постепенного изменения состояния за время эксплуатации (накопление деформаций) железнодорожный путь представлен как система, которая состоит из множества частиц разных материалов, собранных в цельную конструкцию. Уместно говорить не о появлении деформаций какого-то определенного размера в определенном сечении пути, а о вероятности такого события на участке. Если оперировать вероятностью появления отклонений, состояние системы удобно характеризовать количеством разрывов условных внутренних связей. Одинаковому состоянию системы могут соответствовать разные комбинации разрывов. Чем больше количество разрывов, тем больше количество вариантов изменения структуры системы, которые соответствуют ее текущему состоянию. Такой процесс можно представить как постепенный переход от упорядоченного состояния до хаотичного. Для описания приведенной характеристики системы используется такой численный показатель, как энтропия. **Результаты.** При старении системы ее энтропия постоянно увеличивается. Рост энтропии выражается изменениями внутренней энергии системы, определяемыми с использованием механической работы сил, действие которых приводит к деформациям. Это дает возможность определить количественный показатель разрыва связей в системе как следствие выполнения механической работы. По результатам теоретических исследований разработана методика оценки сроков жизненного цикла эксплуатации железнодорожного пути с учетом таких факторов, как: структура поездопотока, конструкция верхнего строения пути, движение поездов с высокими скоростями. **Научная новизна.** Впервые для моделирования накопления деформаций железнодорожного пути применен такой показатель как энтропия системы. **Практическая значимость.** Развернутые аналитические зависимости доведены до практической методики, что дает возможность анализировать участки пути с разными конструкциями или с разными условиями эксплуатации по срокам накопления деформаций.

Ключевые слова: энтропия; верхнее строение пути; остаточные деформации; расчет пути на прочность; напряжения в пути; срок службы пути

D. M. KURHAN^{1*}

^{1*}Dep. «Railway and Railways Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurghan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

ACCUMULATED DEFORMATION MODELING OF PERMANENT WAY BASED ON ENTROPY SYSTEM

Purpose. The work provides a theoretical research about the possibility of using methods that determine the lifetime of a railway track not only in terms of total stresses, and accounting its structure and dynamic characteristics. The aim of these studies is creation the model of deformations accumulation for assessment of service life of a railway track taking into account these features. **Methodology.** To simulate a gradual change state during the operation (accumulation of deformations) the railway track is presented as a system that consists of many particles of different materials collected in a coherent design. It is appropriate to speak not about the appearance of deformations of a certain size in a certain section of the track, and the probability of such event on the site. If to operate the probability of occurrence of deviations, comfortable state of the system is characterized by the number of breaks of the conditional internal connections. The same state of the system may correspond to different combinations of breaks. The more breaks, the more the number of options changes in the structure of the system appropriate to its current state. Such a process can be represented as a gradual transition from an ordered state to a chaotic one. To describe the characteristics of the system used the numerical value of the entropy. **Findings.** Its entropy is constantly increasing at system aging. The growth of entropy is expressed by changes in the internal energy of the system, which can be determined using mechanical work forces, which leads to deformation. This gives the opportunity to show quantitative indication of breaking the bonds in the system as a consequence of performing mechanical work. According to the results of theoretical research methods for estimation of the timing of life cycles of railway operation considering such factors as the structure of the flow of trains, construction of the permanent way, the movement of trains at high speeds was developed. **Originality.** For the first time to simulate the accumulation of deformations of railway tracks this figure as the entropy of the system was used. **Practical value.** Analytic dependences have been brought to practical techniques that make it possible to analyze the track sections with different designs or with different operating conditions in terms of deformation accumulation.

Keywords: entropy; permanent way; residual deformations; railways calculation for strength; tension in a railway; working life of permanent way

REFERENCES

1. Gilyarov V.L. Kineticheskaya kontsepsiya prochnosti i samoorganizovannaya kritichnost v protsesse razrusheniya materialov [Kinetic concept of strength and self-organized criticality in the process of destruction of materials]. *Fizika tverdogo tela – Physics of Solids*, 2005, vol. 47, issue 5, pp. 808-811.
2. Danilenko E.I. *Zaliznychna koliia. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaiemodiia z rukhomym skladom* [Railroad. Arrangement and design calculations, interaction with rolling stock]. Kyiv, Inpres Publ., 2010, vol. 2, 456 p.
3. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist. TsP-0117* [The terms of payment of railway track for strength and stability. TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2004. 64 p.
4. Konovalov A.A. *Entropiya, deformatsiya, teploemkost i zhiznennyi tsikl* [Entropy, deformation, heat capacity and life cycle]. Available at: <http://trinitas.ru/rus/doc/0016/001c/1840-kon.pdf>, 2012 (Accessed 12 June 2015).
5. Kurhan D.M., Zaiats M.A. Vyznachennia ratsionalnoho rozpodilu poizdopotokiv na merezhi zaliznyts [The definition of rational allocation of train-flows on the rail network]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 88-93.
6. Kurhan D.M., Bondarenko I.O. Vplyv stanu zaliznychnoi dilianky i struktury poizdopotoku na zhyttievyi tsykl kolii [The influence of the railway plot state and structure of the train flow in the life cycle of a track] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 19, pp. 67-77.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

7. Kurhan D.M., Bondarenko I.O. Model napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti na osnove volnovoy teorii rasprostraneniya napryazheniy [Model the stress-strain state of railway track based on the wave propagation theory stresses]. *Problemy Kolejnictwa*, 2013, issue 159, pp. 99-111.
8. Kurhan D.M. Osoblyvosti spryiniattia navantazhennia elementamy zaliznychnoi kolii pry vysokykh shvydkostiakh rukhu [Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 2 (56), pp. 13-145. doi: 10.15802/stp2015/42172.
9. Kurilenko G.A. Prognozirovaniye tsiklicheskogo resursa detaley s makrotreshchinami termograficheskim metodom [Prediction of cyclic life of parts with cracks thermographic method]. *Izvestiya Tomskogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Technical University], 2012, vol. 321, no. 2, pp. 36-39.
10. Zheleznov M.M., Pevzner V.O., Solovev V.P., Nadezhin S.S. Nauchnye osnovy modelirovaniya vzaimod-eystviya puti i podvizhnogo sostava v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii [The scientific basis of modeling the interaction of the track and rolling stock in modern conditions]. *Bulleten Obedinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the United Scientific Council of JSC «Russian Railways»], 2014, no. 4, pp. 2-29.
11. Babenko A., Lynnyk H., Moiseienko K., Patlasov O., Yakovlev V. *Polozhennia pro provedennia planovozapobizhnykh remontno-koliinykh robot na zaliznytsiakh Ukrainy. TsP-0287* [Statutes of scheduled preventive maintenance repair and track work on the Railways of Ukraine. TsP-0287]. Kyiv, 2015. 45 p.
12. Dyrda V.I., Sokol S.P., Kalgankov Ye.V., Kolbasin V.A., Tolstenko A.V. Raschet dolgovechnosti uprugonasledstvennykh sred pri dlitelnom tsiklicheskom nagruzhennii [The service life of elastic-hereditary environments with long-term cyclic loading]. *Heotekhnichna mekhanika – Geotechnical mechanics*, 2013, no. 108, pp. 111-122.
13. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevskiy E.Ye. Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel [The kinetic nature of strength solids]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Advances in Physical Sciences*, 1972, vol. 106, issue 2, pp. 193-228.
14. Patlasov O.M., Rybkin V.V., Paleichuk Yu.V., Solomakha S.O., Panchenko P.V. *Tekhnichni vkazivky shchodo otsinky stanu reikovoï kolii za pokaznykamy koliievymiriuvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovoï kolii. TsP-0267* [Technical guidance on the assessment of the condition of a rail track on track indicators of measuring cares and ensure the safe movement of trains with departures from the norms of the track. TsP-0267]. Kyiv, 2012. 25 p.
15. *Transportna stratehiia Ukrainy na period do 2020 roku* [The transport strategy of Ukraine for the period till 2020]. Available at: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80> (Accessed 12 June 2015).
16. Fischer S., Horvát F. Superstructure Stabilization of Ballast Bedded Railway Tracks with Geogrids. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 2011, vol. 39, no. 1, pp. 101-106.
17. Horvát F., Fischer S., Major Z. Evaluation of railway track geometry stabilisation effect of geogrid layers under ballast on the basis of laboratory multi-level shear box tests. *Acta Technica Jaurinensis*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 21-44.
18. Jiang H.C., Wang Z., Balents L. Identifying topological order by entanglement entropy. *Nature Physics*, 2012, vol. 8, pp. 902-905.
19. Tucker J.P., Chan D.K., Subbarayan G., Handwerker C.A. Maximum entropy fracture model and its use for predicting cyclic hysteresis in Sn₃. 8Ag₀. 7Cu and Sn₃. 0Ag₀. 5 solder alloys. *Microelectronics Reliability*, 2014, vol. 54 (11), pp. 2513-2522. doi: 10.1016/j.microrel.2014.04.012.
20. Bhattacharya J., Nozaki M., Takayanagi T., Ugajin T. Thermodynamical property of entanglement entropy for excited states. *Physical review letters*, 2013, vol. 110 (9), pp. 091602. doi: 10.1103/PhysRevLett.110.091602.

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

Надійшла до редколегії 13.05.2015

Прийнята до друку 01.07.2015