

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.1.033.34

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 ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. Стан залізничної колії повинен відповідати умовам безпеки руху, плавності й комфортабельності їзди. Наявність нерівностей погіршує динаміку взаємодії колії та рухомого складу, стає причиною обмеження швидкості руху, створює можливість порушення умов безпеки руху. Постає питання дослідження факторів, що призводять до можливості утворення нерівностей колії та процесу їх розвитку. Метою даної роботи є аналіз процесів виникнення та розвитку нерівностей у зоні вертикальної нерівнопружності залізничної колії із застосуванням математичного моделювання. **Методика.** Залізнична колія під поїздами працює як система пружних тіл, тому поява та розвиток нерівностей можна представити як процес переходу від пружних до залишкових деформацій. Збільшення розмірів нерівності буде впливати на динаміку взаємодії колії та рухомого складу не тільки під час розташування колеса безпосередньо в зоні нерівності, а й на певній відстані за її межами. Тому для дослідження розвитку нерівності, в тому числі по довжині колії, необхідно моделювати саме процес руху колісного навантаження по ділянці. Прийнята модель, яка складається із колісної пари, що рухається по безінерційній балці та опирається на окремі опори. Вона описується системою диференціальних рівнянь Лагранжа. Введена гіпотеза, що рівень залишкових деформацій розподіляється пропорційно похідній динамічного прогину. **Результати.** Розташування вертикальної нерівності по довжині не обов'язково повторює місце положення проблемної ділянки. З часом експлуатації вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й уздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та появою нових. Це призводить до розвитку так званих «ям» на підході до нерівнопружної ділянки. **Наукова новизна.** Набули подальшого розвитку задачі моделювання взаємодії колії і рухомого складу, зокрема для врахування ділянок нерівнопружності та їх впливу на утворення нерівностей колії. Запропоновані нові підходи щодо моделювання процесу переходу від пружних до залишкових деформацій, які дають змогу прогнозувати розвиток розмірів нерівностей колії в залежності від характеристик ділянки. **Практична значимість.** Отримані автором результати можуть бути використані для визначення термінів призначення ремонтних робіт із оновлення рівнопружності колії, а також для аналізу заходів, спрямованих на запобігання розвитку нерівностей у зонах із змінною пружністю залізничної колії.

Ключові слова: залізнична колія; нерівність колії; деформація колії; нерівнопружність колії; взаємодія колії і рухомого складу; залізничний переїзд

Вступ

Протягом всього періоду експлуатації стан залізничної колії повинен відповідати заданим умовам, особливо можливості реалізації встановлених

швидкостей руху. Стан колії прийнято оцінювати показниками її геометричного положення.

Під час експлуатації колії, навіть за умови повної відповідності до встановлених норм, поступово з'являються та розвиваються різні геомет-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ричні нерівності. Можна вважати, що їх усунення та запобігання і є основною задачею виконання проміжних ремонтів колії та її поточного утримання [11].

Наявність суттєвих нерівностей погіршує динаміку взаємодії колії і рухомого складу, створює можливість порушення умов комфортабельності їзди або навіть безпеки руху. При досягненні певних розмірів нерівності стають причиною обмеження швидкостей руху [14]. Особливо актуальним це питання є в умовах сучасних тенденцій збільшення швидкості руху [7, 15], враховуючи, що норми утримання колії в такому випадку стають більш вимогливими.

Багато сучасних наукових робіт присвячено проблемам, які пов'язані з дослідженням нерівностей колії. Це і питання їх впливу на динамічні показники руху поїздів [8, 10, 17, 20], і засоби та методи їх вимірювання та оцінки [12, 16], і проектування заходів щодо укріплення шарів підрейкової основи для запобігання появи нерівностей [18–21] тощо.

Постає питання дослідження факторів, що призводять до можливості утворення нерівностей колії та процесу їх розвитку. Враховуючи те, що роботу залізничної колії під поїздами природно подати як систему пружних тіл, появу і розвиток нерівностей можна описати як процес переходу від пружних до залишкових деформацій. Причому приводом для цього, як правило, є ділянки локальної нерівнопружності (про що наголошується в багатьох наукових дослідженнях).

Нерівнопружність підрейкової основи може виникати у різних випадках. Це може бути наслідок порушень стану залізничної колії – наявність просядок, непридатних скріплень, забруднення баласту тощо [1, 20]. Найбільш чутливими до розвинення місць нерівнопружності є ділянки з інтенсивним рухом або з обпиранням на слабкі ґрунти. Також нерівнопружність колії може бути зумовлена конструкційними особливостями, такими як примикання до безбаластних мостів [13], наявність переїздів [6, 22] тощо.

Мета

Метою цієї роботи є аналіз процесів виникнення і розвитку нерівностей в зоні вертикальної нерівнопружності залізничної колії з застосуванням математичного моделювання.

Методика

На сьогодні існує багато різноманітних фізико-математичних методів моделювання взаємодії колії і рухомого складу. Залежно від задачі, що розв'язується, можуть використовуватися як відносно прості плоскі розрахункові схеми, так і розвинені моделі, які описуються системами з десятками рівнянь. Незважаючи на те, що завжди йдеться про процес взаємодії колії і рухомого складу, все ж задачі, що спрямовані на дослідження рухомого складу, і ті, що спрямовані на дослідження залізничної колії, мають принципові відмінності. Модель рухомого складу – це, в більшості випадків, система руху (коливань) набору пов'язаних твердих тіл. Як правило, для математичного опису таких моделей використовують принцип Д'Аламбера. Роботу залізничної колії більш доцільно описувати не через переміщення тіл, а через їх деформації. Тому для математичного опису залізничної колії частіше застосовують моделі, що базуються безпосередньо на теорії пружності або на її числових реалізаціях, таких як FEM (finite element method) та інших.

Так, з використанням FEM авторами робіт [9, 10] було виконано дослідження процесу накопичення вертикальної деформації колії в дослідному перерізі від багатоциклічного прикладання сили. Суть моделювання процесу, описаного в цих роботах: в першому розрахунку було отримано зміщення шпали в вертикальній площині під дією прикладеного навантаження; для кожної наступної ітерації розрахунків повторюється, але для кожної шпали зберігається її зміщення, набуто у попередньому розрахунку, у вигляді повітряного зазору.

Результати розрахунків ітераційного моделювання осадки колії наведено на рис. 1. Таким чином в роботі [10] було зроблено висновок, що із збільшенням кількості ітерацій (пропуску тоннажу) відбувається розвиток осадки колії, але швидкість цього процесу з часом зменшується.

Збільшення нерівності впливатиме на динаміку взаємодії колії і рухомого складу. Причому цей вплив буде відчутний не тільки під час розташування колеса безпосередньо в зоні нерівності, а й на певній відстані за її межами (за рахунок поступової стабілізації коливань та перерозподілу сил між колесами візка). Тому для дослідження розвитку нерівності (особливо

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

змін її характеристик по довжині колії) необхідно моделювати саме процес руху колеса по ділянці.

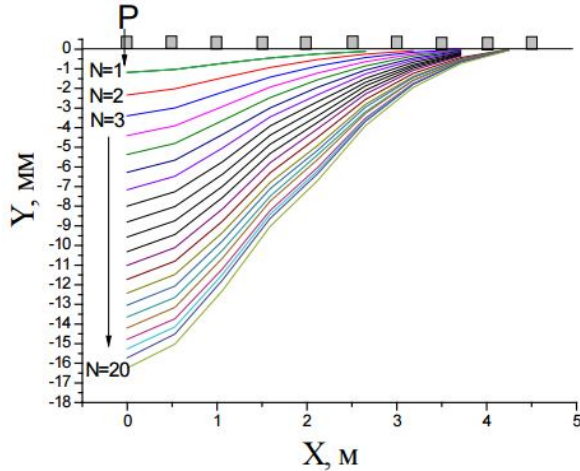


Рис. 1. Результати розрахунків ітераційного FEM моделювання осадки колії [10]:
 P – зовнішнє навантаження; Y – осадка; X – відстань від точки дії сили; N – номер ітерації

Враховуючи те, що для цієї задачі всі фактори, крім вертикальної динаміки, будуть зайвими, прийнята спрощена модель, яка складається з колісної пари, що рухається по безінерційній балці (рейка), яка опирається на окремі опори (шпали). Було враховано навантаження, що передається від колісної пари, жорсткі та дисипативні зв'язки між тілами моделі, можливість завдання різної жорсткості для кожної опори та геометричного обрису рейки в вертикальній площині, рис. 2.

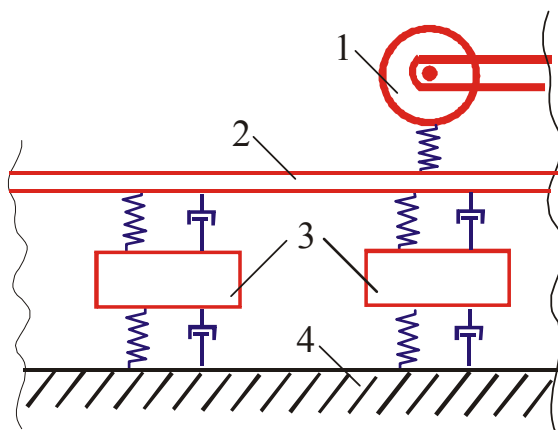


Рис. 2. Розрахункова схема моделювання взаємодії колії і рухомого складу:
 1 – колесо; 2 – рейка;
 3 – шпали; 4 – підшпальна основа

Математичний опис моделі складається з системи диференціальних рівнянь Лагранжа II роду і не має принципових від'ємностей від аналогічних робіт [2, 4].

Відокремлення залишкових деформацій від загальних є складною науковою задачею, особливо для таких багатопарових систем як залізнична колія.

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

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{\text{зал}}(x) &\sim \frac{dz_{\text{дин}}(x)}{dx}, \\ \Delta z_{\text{зал}}(x) &\leq f(T), \\ \exists x, \Delta z_{\text{зал}}(x) &= f(T) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Результати

Запропонований підхід надає змогу дослідити процес появи нерівності від наявності нерівнопружності колії та її подальший розвиток в процесі експлуатації.

Розглянемо хід розрахунків на прикладі з дійсними числовими вихідними даними. Приймемо ділянку залізничної колії з місцем локальної нерівнопружності, яка описана лінійною зміною модуля пружності підрейкової основи від 40 до 30 МПа посередині ділянки на довжині 5 м [5]. Це відповідає такій послідовності в приведенні до опор (шпал):

$$U = \{40, \dots, 40, 37, 33, 30, 33, 37, 40, \dots, 40\}. \quad (2)$$

Перший розрахунок виконується для колії без нерівностей. На рис. 3 наведено результати моделювання у вигляді динамічного прогину по довжині ділянки від проходження рухомого

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

складу. Прогин в зоні із сталим модулем пружності підрейкової основи відповідає аналітичним розрахункам за відомою формулою [2, 3]

$$z(x) = Pk/2U, \quad (3)$$

де P – вертикальна сила, діюча від колеса на рейку; k – коефіцієнт відносної жорсткості.

Відповідно до алгоритму (1) були визначені залишкові деформації і передані до моделі як вихідна геометрична нерівність колії для наступної ітерації. Таким чином моделюється процес поступового розвитку нерівності – рис. 4. Для візуального відокремлення результатів послідовності ітерацій на рис. 4 наведена з пропущенням проміжних кроків.

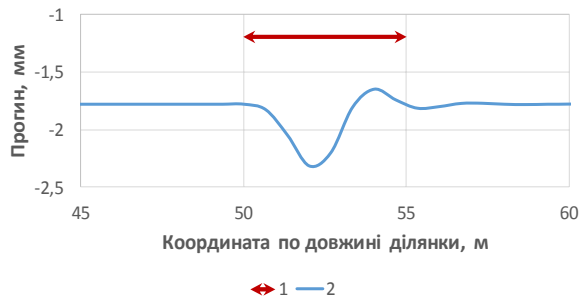


Рис. 3. Динамічний прогин колії для ділянки без нерівності з локальною нерівнопружністю: 1 – зона нерівнопружності; 2 – прогин колії

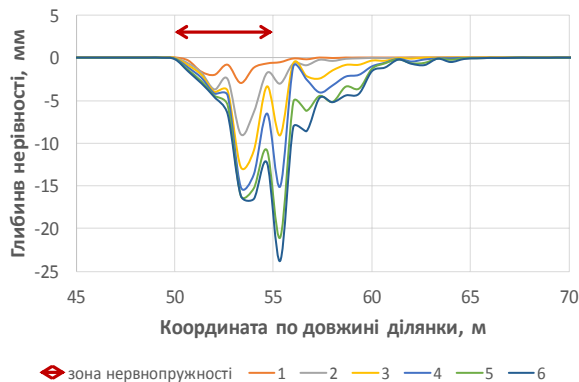


Рис. 4. Моделювання розвитку нерівності колії в зоні локальної нерівнопружності: 1–6 – послідовність ітерацій розрахунку

Аналогічно до розглянутого числового прикладу було здійснено варіантні розрахунки для різних вихідних даних. Дослідження результатів дозволяють встановити певні тенденції. Обрис нерівності, яка утворена залишковими деформаціями, не повторює ні обрис динамічного прогину рейки, ні обрис первинної нерівно-

пружності. Залишкові деформації набувають максимуму при вході й виході з динамічної нерівності (спочатку це зона нерівнопружності, проходження по якій порушує траєкторію руху колеса, а згодом – поєднання її із геометричною (статичною) нерівністю). Під час експлуатації ділянки вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й вздовж колії, причому збільшення довжини супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та утворенням нових. Розвиток нерівності із поступовим зміщенням піків призводить до того, що вона сама по собі стає більш суттєвим фактором додаткової силової взаємодії порівняно з первинним – локальною нерівнопружністю, що спричиняє подальше розширення і зміщення нерівності. Наслідком цього є те, що геометрична нерівність не завжди чітко співпадає з місцем розташування причини її утворення.

В розглянутому прикладі (рис. 4) причиною утворення нерівності була зона нерівнопружності. Але після того, як нерівність набуває певних розмірів, вже саме вона визначає динаміку взаємодії колії і рухомого складу і, як наслідок, подальший розвиток процесу. Для демонстрації цього спостереження ітерації в попередньому прикладі було зупинено, при утворенні просадки II ступеня [14] – лінія «3» на рис. 4. Для подальших розрахунків був заданий постійний модуль пружності підрейкової основи по всій довжині ділянки. Обрис нерівності, яка була отримана в результаті, наведено на рис. 5. Для порівняння на цей рисунок також було накладено нерівність з попереднього прикладу (лінія «6», рис. 4). З рис. 5 видно, що зона локальної нерівності вже не мала суттєвого впливу на процес розвитку деформацій.

В певних випадках створення зони нерівнопружності колії може бути спровоковане не відхиленнями в утриманні, а визначатися конструктивними особливостями, наприклад: ділянка переходу від баластної колії до мосту [13] або зона переїзду [5, 6]. Відповідно до запропонованої методики був промодельований процес розвитку вертикальних нерівностей в зоні переїзду. Зона переїзду у вихідних даних задавалася як ділянка колії з різким збільшенням модуля пружності підрейкової основи [6]:

$$U = \{40, \dots, 40, 120, \dots, 120, 40, \dots, 40\}. \quad (4)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

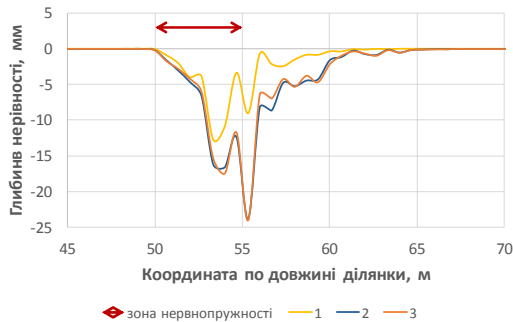


Рис. 5. Моделювання розвитку нерівності колії для різних варіантів стану ділянки:

1 – вихідна нерівність; 2 – нерівність, утворена з врахуванням впливу первинної зони нерівнопружності; 3 – нерівність, утворена з вихідної за умов поновлення рівнопружності ділянки



Рис. 6. Моделювання розвитку нерівності колії в зоні переїзду:

1–6 – послідовність ітерацій розрахунку

Як впливає з наведеного прикладу, наявність переїзду, створивши зону із збільшеним модулем пружності підрейкової основи, провокує появу нерівності колії. Максимальні амплітуди такої нерівності будуть розташовуватися на початку і в кінці утворення. Під час експлуатації ділянки нерівність буде розвиватися, в тому числі по довжині колії, що призведе до виникнення «ям» за межами розташування конструкції. Такі висновки корелюються і з результатами статистичної обробки обмірів натурних нерівностей перед мостами з безбаластною конструкцією та в зоні розташування переїздів, які наведені в роботах [5, 6, 13] та інших.

Наукова новизна та практична значимість

Набули подальший розвиток задачі моделювання взаємодії колії і рухомого складу, зокрема для врахування ділянок нерівнопружності та їх впливу на утворення нерівностей колії.

Запропоновані нові підходи щодо моделювання процесу переходу від пружних до залишкових деформацій, які дають змогу прогнозувати розвиток розмірів нерівностей колії залежно від характеристик ділянки.

Отримані результати можуть бути використані для визначення термінів призначення ремонтних робіт для оновлення рівнопружності колії (поточне утримання, комплексно-оздоровчий ремонт, середній ремонт), а також для аналізу заходів, спрямованих на запобігання розвитку нерівностей в зонах із змінною пружністю залізничної колії.

Висновки

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.

Під час експлуатації ділянки 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 зменшується, але процес набуває розвитку в інших місцях, що, як правило, призводить до розвитку «ям» на підході до нерівнопружної ділянки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гавриленко, А. К. Учет жесткости железнодорожного пути / А. К. Гавриленко // Путь и путевое хоз-во. – 2007. – № 4. – С. 37–39.
2. Даніленко, Е. І. Залізнична колія : підруч. для вищ. навч. закл. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
3. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
4. Данович, В. Д. Математическая модель взаимодействия пути и пассажирского вагона при движении по участкам произвольной кривизны / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізнич. трансп. – Дніпропетровськ, 2001. – Вип. 8. – С. 124–138.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

5. Курган, Д. М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівнопружності підрейкової основи / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 90–99. doi: 10.15802/stp2015/38250.
6. Курган, М. Б. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів / М. Б. Курган, Д. М. Курган, О. Ф. Лужицький // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 84–96. doi: 10.15802/stp2015/55341.
7. Курган, Н. Б. Предпосылки создания высокоскоростных магистралей в Украине / Н. Б. Курган // Укр. залізниця. – 2015. – № 5–6. – С. 16–21.
8. Лапина, Л. Г. Анализ статистических характеристик просадок рельсовых нитей и построение базовых неровностей пути / Л. Г. Лапина // Техн. механика. – 2013. – № 1. – С. 17–24.
9. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций пути с использованием супер ЭВМ / В. П. Соловьев, А. В. Анисин, С. С. Надежин [и др.] // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития ж.-д. трансп. : сб. тр. членов и науч. партнеров Объединен. ученого совета ОАО «РЖД». – Москва : Интекст, 2013. – С. 185–192.
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 : Девалта, 2015. – 45 с.
12. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути / В. С. Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 5 (47). – С. 97–104. doi: 10.15802/stp2013/17971.
13. Талавіра, Г. М. Осідання основної площадки земляного полотна від рухомого складу на перехідних ділянках перед штучними спорудами / Г. М. Талавіра // Зб. наук. пр. Київ. ун-ту екон. і технол. трансп. Серія: «Транспортні системи і технології» / Київ. ун-т екон. і технол. трансп. – Київ, 2003. – Вип. 4. – С. 80–84.
14. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0267 / О. М. Патласов, В. В. Рибкін, Ю. В. Палейчук [та ін.] : затв. наказом Укрзалізничці № 033-Ц від 1.02.2012 р. – Київ : Транспорт України, 2012. – 25 с.
15. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.kmu.gov.ua/kmu/docs/EA/00_Ukraine-EU_Association_Agreement_%28body%29.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 29.12.2015.
16. Уманов, М. И. Совершенствование оценки состояния пути с использованием среднеквадратических отклонений его геометрических параметров / М. И. Уманов, А. М. Патласов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 109–114.
17. Ушкалов, В. Ф. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – С. 135–144. doi: 10.15802/stp2013/16600.
18. Fischer, S. Investigation of inner shear resistance of geogrids built under granular protection layers and railway ballast / S. Fischer // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – Р. 97–106. doi:10.15802/stp2015/53169.
19. 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, Sz. Fischer, Z. Major // Acta Technica Jaurinensis. – 2013. – № 2. – Р. 21–44.
20. Lichtberger, B. Thack compendium / B. Lichtberger. – Hamburg : Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co., 2005. – 634 p.
21. Petrenko, V. Simulation of subgrade embankment on weak base / V. Petrenko, I. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – Р. 198–204. doi:10.15802/stp2015/49286.
22. Szabó, L. The Initiation of Safety-Enhancing Actions in Railway Crossings Using Modelling Procedures / L. Szabó, M. Somogyi, G. Horváth // Acta Technica Jaurinensis. – 2015. – № 2. – Р. 96–112. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n2.328.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

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 ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Состояние железнодорожного пути должно соответствовать безопасности движения, плавности и комфортабельности движения. Наличие неровностей ухудшает динамику взаимодействия пути и подвижного состава, является причиной ограничения скорости движения, создает возможность нарушения условий безопасности движения. Возникает вопрос исследования факторов, которые приводят к возможности образования неровностей пути, и процесса их развития. Целью данной работы является анализ процессов возникновения и развития неровностей в зоне вертикальной неравножесткости железнодорожного пути с использованием математического моделирования. **Методика.** Железнодорожный путь под поездами работает как система упругих тел, поэтому появление и развитие неровностей можно представить как процесс перехода от упругих к остаточным деформациям. Увеличение размеров неровности будет влиять на динамику взаимодействия пути и подвижного состава не только во время нахождения колеса непосредственно в зоне неровности, а и на определенном расстоянии за ее пределы. Поэтому для исследования развития неровности, в том числе по длине пути, необходимо моделировать именно процесс движения колесной нагрузки по участку. Принята модель, состоящая из колесной пары, которая движется по безинерционной балке, опирающейся на отдельные опоры. Она описывается системой дифференциальных уравнений Лагранжа. Введена гипотеза, что уровень остаточных деформаций распределяется пропорционально производной динамического прогиба. **Результаты.** Расположение вертикальной неровности по длине не обязательно повторяет место положения проблемного участка. Со временем эксплуатации вертикальная неровность распространяется не только в глубину, но и вдоль пути, причем увеличение длины сопровождается смещением положения локальных максимумов и появлением новых. Это приводит к развитию так называемых «ям» на подходе к неравножесткому участку. **Научная новизна.** Приобрели дальнейшее развитие задачи моделирования взаимодействия пути и подвижного состава, в частности, для учета участков неравножесткости и их влияния на образование неровностей пути. **Практическая значимость.** Полученные автором результаты могут быть использованы для определения сроков проведения ремонтных работ по возобновлению равножесткости пути, а также для анализа мероприятий, направленных на предотвращение развития неровностей в зонах с переменной жесткостью железнодорожного пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь; неровность пути; деформация пути; неравножесткость пути; взаимодействие пути и подвижного состава; железнодорожный переезд

D. M. KURHAN^{1*}

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

MODELING OF DEVELOPMENT VERTICAL DEFORMATION OF RAILWAY TRACK

Purpose. State of railway track must meet the conditions of safety, comfort and smooth ride. The presence of irregularities deteriorates the dynamics of interaction of track and rolling stock, causes speed limiting, creates the possibility of movement safety violation. This brings up the question concerning the study of the factors leading to the possibility of track irregularities and the process of their development. The purpose of this paper is to analyse the processes of emergence and development of irregularities in the area of unequal vertical elasticity of railway track using mathematical modelling. **Methodology.** Railroad under the trains works as the system of elastic bodies, so the emergence and development of irregularities can be represented as the transition from elastic to permanent strain.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Irregularity development will affect the dynamics of interaction between track and rolling stock not only at the wheel location directly in the area of irregularity, but also at a certain distance beyond. Therefore, to study the development of irregularities, including those along the track, it is necessary to model the process of wheel load movement along the area. The adopted model consists of a wheel set moving on inertia-free beam and resting on individual supports. It is described by Lagrange differential equations. The work introduced the hypothesis that the level of permanent strain is distributed in proportion to the dynamic deflection derivative. **Findings.** Location of vertical longwise irregularity does not necessarily reproduce the location of the problem area. While in operation the vertical irregularity extends not only in depth but also along the track, herewith the increase in length is accompanied by the displacement of local maxima and the emergence of new ones. This leads to the development of so-called «pits» when approaching unequal-elastic areas. **Originality.** The work provides further development of tasks for track and rolling stock interaction modelling, in particular aimed to take into account the unequal elasticity areas and their influence on the formation of the track irregularities. The paper proposes new approaches to modelling the transition from elastic to permanent strain that allows predicting the development of track irregularity sizes depending on the area characteristics. **Practical value.** The results obtained by the author can be used to determine the schedule for track equal elasticity renovation works, as well as to analyse the measures aimed at the prevention of irregularities in areas with variable elasticity of railway track.

Keywords: track; track irregularity; rail deflection; unequal elasticity of track; interaction of track and rolling stock; railroad crossing

REFERENCES

1. Gavrilenko A.K. Uchet zhestkosti zheleznodorozhnogo puti [Accounting of rigidity of a railway]. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2007, no. 4, pp. 37-39.
2. Danilenko E.I. *Zaliznychna koliia. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaemodiia z rukhomym skladom* [Railway track. Structure, planning and calculations, interaction with rolling stock]. Kyiv, Inpres Publ., 2010, vol. 2. 456 p.
3. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyly rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist. TsP-0117* [Rules of calculations of the railway track strength and stability. TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2004. 64 p.
4. Danovich V.D., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. Matematicheskaya model vzaimodeystviya puti i passazhirskogo vagona pri dvizhenii po uchastkam proizvolnoy krivizny [Mathematical model of interaction between the track and the passenger car when driving on sections of arbitrary curvature]. *Transport – Transport*, 2001, vol. 8, pp. 124-138.
5. Kurhan D.M. Do vyreshennia zadach rozrakhunku kolii na mitsnist iz urakhuvanniam nerivnoprzhnosti pidreikovoii osnovy [To the solution of problems about the railways calculation for strength taking into account unequal elasticity of the subrail base]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 1 (55), pp. 90-99. doi: 10.15802/stp2015/38250.
6. Kurhan M.B., Kurhan D.M., Luzhytskyi O.F. Doslidzhennia nerivnostei kolii v mezhakh zaliznychnykh pereizdiv [Inequalities research of the track at the railroad crossings]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp.84-96. doi: 10.15802/stp2015/55341.
7. Kurgan N.B. Predposylki sozdaniya vysokoskorostnykh magistralei v Ukraine [Prerequisites for creation of high-speed lines in Ukraine]. *Ukrainski zaliznytsi – Ukrainian Railways*, 2015, no. 5-6, pp. 16-21.
8. Lapina L.G. Analiz statisticheskikh kharakteristik prosadok relsovykh nitey i postroeniye bazovykh nerovnostey puti [Analysis of statistical characteristics of rail sagging and the construction of basic irregularities of the track]. *Tekhnicheskaya mekhanika – Technical Mechanics*, 2013, no. 1, pp. 17-24.
9. Solovev V.P., Anisin A.V., Nadezhin S.S., Pevzner V.O., Tretyakov I.V. Modelirovaniye protsessa nakopleniya ostatochnykh deformatsiy puti s ispolzovaniyem super EVM [Modeling of accumulation process of residual deformations of the track using a super computer]. *Fundamentalnyye issledovaniya dlya dolgosrochnogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta : sbornik trudov chlenov i nauchnykh partnerov. Obedineniye uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Fundamental research for long-term railway transport development : Proc. of members and scientific partners Association of the scientific Council of JSC «RZD»]. Moscow, Inteks Publ., 2013, pp. 185-192.
10. Zheleznov M.M., Pevzner V.O., Solovev V.P., Nadezhin S.S. Nauchnyye osnovy modelirovaniya vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii [The scientific basis of modeling the interaction of track and rolling stock in modern conditions]. *Byulleten Obedinennogo uchenogo soveta OAO «RZhD»* [Bulletin of the joint scientific council of JSC «RZD»], 2014, no. 4, pp. 2-29.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

11. Babenko A., Lynnyk H., Moiseienko K. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robot na zaliznytsiakh Ukrainy. TsP-0287* [The provision on scheduled preventive maintenance repair and track work on the Railways of Ukraine. TsP-0287]. Kyiv, Devalta Publ., 2015. 45 p.
12. Kossov V.S., Bidulya A.L., Krasnov O.G., Akashev M.G. Rezultaty ekspluatatsionnykh ispytaniy geometricheski-silovogo metoda otsenki sostoyaniya puti [The field test results of geometric-force method for track state estimation]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 5 (47), pp. 97-104. doi: 10.15802/stp2013/17971.
13. Talavira H.M. Osidannia osnovnoi ploschadky zemlianoho polotna vid rukhomoho skladu na perekhidnykh diliankakh pered shtuchnyimi sporudamy [Precipitation of the main site of the subgrade from rolling stock on transient phases before man-made structures]. *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnologii transportu: Seriya: «Transportni systemy i tekhnologii»* [Proc. of Kyiv University of economy and technology of transport: Series: «Transportation systems and technologies»]. Kyiv, KUETT Publ., 2003, issue. 4, pp. 80-84.
14. Patlasov O.M., Rybkin V.V., Paleichuk Yu.V. Tekhnichni vkazivky shchodo otsinky stanu reikovoï kolii za pokaznykamy koliievymiriuvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymanna reikovoï kolii. TsP-0267 [Technical guidance on the assessment of the condition of the track according to the indicators of the track measuring cars and ensure the safe movement of trains when deviations from the norms of keeping the track. TsP-0267]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2012. 25 p.
15. Uhoda pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnyimi derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony [The Association agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European atomic energy community and their member States, on the other hand]. Available at: http://www.kmu.gov.ua/kmu/docs/EA/00_Ukraine-EU_Association_Agreement_%28body%29.pdf. (Accessed 29 December 2015).
16. Umanov M.I., Patlasov A.M. Sovershenstvovaniye otsenki sostoyaniya puti s ispolzovaniyem srednekvadrateskikh otkloneniy ego geometricheskikh parametrov [Improving the estimation of track condition using standard deviations of its geometrical parameters]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 109-114.
17. Ushkalov V.F., Lapina L.G., Mashchenko I.A. Raschetnyye vozmushcheniya dlya otsenki dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov [Calculated disturbances for evaluation of dynamical properties of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 4 (46), pp. 135-144. doi: 10.15802/stp2013/16600.
18. Fischer S. Investigation of inner shear resistance of geogrids built under granular protection layers and railway ballast. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 5 (59), pp. 97-106. doi:10.15802/stp2015/53169.
19. Horvát F., Fisher Sz., 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, no. 2, pp. 21-44.
20. Lichtberger B. Thack compendium. Hamburg, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. Publ., 2005. 634 p.
21. Petrenko V., Sviatko I. Simulation of subgrade embankment on weak base. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 4 (58), pp. 198-204. doi:10.15802/stp2015/49286.
22. Szabó L., Somogyi M., Horváth G. The Initiation of Safety-Enhancing Actions in Railway Crossings Using Modelling Procedures. *Acta Technica Jaurinensis*, 2015, no. 2, pp. 96-112. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n2.328.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна); д.т.н., проф. Е. І. Даниленком (Україна)

Надійшла до редколегії 03.12.2015

Прийнята до друку 04.02.2016