УДК 629.7 https://doi.org/10.15407/itm2019.03.066

В. Ф. УШКАЛОВ, Т. Ф. МОКРІЙ, І. Ю. МАЛИШЕВА, Н. В. БЕЗРУКАВИЙ

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСУ ГОЛОВОК ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
ул. Лєшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: Mokrii.T.F@nas.gov.ua

Сьогодні при збільшенні швидкостей руху залізничного рухомого складу, зростанні об'ємів та номенклатури вантажів, що перевозяться, розвитку пасажирських перевезень, а також при підготовці мережі залізниць до пропускання вагонів з підвищеними осьовими навантаженнями назріла необхідність у проведенні детальних експериментальних і теоретичних досліджень процесів, що відбуваються при взаємодії екіпажів та колії. Зокрема, прогнозування стану і зносу рейок набуває суттєве значення. У цьому процесі можна виділити два підходи. Перший – це прогнозування бічного зносу рейок і терміну їхньої служби, другий – теоретичні дослідження з прогнозування зміни окреслень головок рейок внаслідок зносу при експлуатації.

Мета даної статті полягала в розробці способу теоретичного прогнозування зміни профілів головок рейок при зносі. Застосовано методи математичного моделювання, числового інтегрування, теорії коливань, статистичної динаміки.

У статті запропоновано спосіб прогнозування послідовного зносу рейок і зміни профілів їхніх головок з використанням математичної моделі взаємодії колеса та рейки з розподіленими контактними силами. Розроблений алгоритм прогнозування ґрунтується на числовому інтегруванні системи диференціальних рівнянь, що описують просторові коливання залізничного екіпажа при русі по колії довільного окреслення в плані.

Апробацію розробленого математичного забезпечення проведено при прогнозуванні зносу головок рейок Р65 на прямій і круговій кривій ділянках колії. Розрахунки виконано для навантаженого піввагона із серійними візками моделі 18-100 та стандартними колесами з різним ступенем зносу обода. Здійснено порівняння прогнозних і експериментальних даних. Показано, що запропонований спосіб дозволяє досить точно прогнозувати зміни форми профілів головок рейок при зносі в результаті експлуатації.

***Ключові слова**: прогнозування послідовного зносу рейок, апробація математичного забезпечення, піввагон, порівняння прогнозних та експериментальних даних.*

Сегодня при увеличении скоростей движения железнодорожного подвижного состава, росте объемов и номенклатуры перевозимых грузов, развитии пассажирских перевозок, а также при подготовке сети железных дорог к пропуску вагонов с повышенными осевыми нагрузками назрела необходимость в проведении детальных экспериментальных и теоретических исследований процессов, происходящих при взаимодействии экипажей и пути. В частности, прогнозирование состояния и износа рельсов приобретает существенное значение. В этом процессе можно выделить два подхода. Первый – это прогнозирование бокового износа рельсов и срока их службы, второй – теоретические исследования по прогнозированию изменения очертаний головок рельсов вследствие износа при эксплуатации.

Цель данной статьи заключалась в разработке способа теоретического прогнозирования профилей головок рельсов при износе. Использовались методы математического моделирования, численного интегрирования, теории колебаний, статистической динамики.

В статье предложен способ прогнозирования последовательного износа рельсов и изменения профилей их головок с использованием математической модели взаимодействия колеса и рельса с распределенными контактными силами. Разработанный алгоритм прогнозирования основан на численном интегрировании системы дифференциальных уравнений, описывающих пространственные колебания железнодорожного экипажа при движении по пути произвольного очертания в плане.

Апробация разработанного математического обеспечения проведена при прогнозировании износа головок рельсов Р65 на прямом и круговом кривом участках пути. Расчеты выполнены для груженого полувагона с серийными тележками модели 18-100 и стандартными колесами с разной степенью износа обода. Произведено сравнение прогнозных и экспериментальных данных. Показано, что предложенный способ позволяет достаточно точно прогнозировать изменения формы профилей головок рельсов при износе в результате эксплуатации.

***Ключевые слова:** прогнозирование последовательного износа рельсов, апробация математического обеспечения, полувагон, сравнение прогнозных и экспериментальных данных.*

An increase in train speed and freight traffic volume and range, the development of passenger traffic, and the adaptation of the railway network to cars with increased axle loads call for comprehensive experimental and theoretical studies of vehicle–track interaction processes. In particular, the prediction of rail condition and wear attains great significance. Here, two approaches may be distinguished. One is the prediction of rail side wear and service life, and the other lies in theoretical investigations into the prediction of the wear-caused change of the rail head shape.

© В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрій, І. Ю. Малишева, Н. В. Безрукавий, 2019

The aim of this work was to develop a method for the theoretical prediction of rail head profiles under wear. Use was made of methods of mathematical simulation, numerical integration, oscillation theory, and statistical dynamics.

This paper presents a method for the prediction of successive rail wear and rail head profile change with the use of a mathematical model of wheel–rail interaction with distributed contact forces. The prediction algorithm is based on a numerical integration of the system of differential equations that describe the spatial oscillations of a rail vehicle moving over a track of arbitrary alignment.

The software developed was verified in the prediction of R65 rail head wear in a tangent track section and in a circular curve for a loaded gondola car with standard 18-100 trucks and standard wheels with different degrees of rim wear. The predicted data were compared with experimental ones. It was shown that the proposed method sufficiently accurately predicts the wear-caused change of the rail head profile.

Keywords: *prediction of successive rail wear, software verification, gondola car, comparison of predicted and experimental data.*

Практично одночасно з появою залізничного транспорту почали проводитися пошуки раціональних профілів поверхні катання коліс і рейок, а також раціональних конструктивних рішень як в області рейкової колії, так і в області рухомого складу. На початковому етапі ефективність тих або інших технічних рішень оцінювалася за результатами експлуатаційних спостережень. Зі збільшенням швидкості руху, зростанням об'ємів та номенклатури вантажів, що перевозяться, розвитком пасажирських перевезень, а також для підготовки мережі залізниць до пропускання вагонів з підвищеними осьовими навантаженнями назріла необхідність у проведенні детальних експериментальних і теоретичних досліджень процесів, що відбуваються при взаємодії рухомого складу та колії.

Сьогодні в прогнозуванні стану і зносу рейок можна виділити два підходи. Перший – це прогнозування бічного зносу рейок і терміну їх служби, другий – теоретичні дослідження з прогнозування зміни профілів головок рейок внаслідок зносу при експлуатації.

При використанні першого підхода стан рейок і процес взаємодії рухомого складу та колії прогнозуються в основному при аналізі даних геометричних вимірювань, що виконуються на дистанціях колії [1]. Для виявлення механізмів зношування рейок, особливо їхньої бокової поверхні, проводяться металографічні, електронно-мікроскопічні і рентгеноструктурні дослідження зразків зношених рейок [2].

Теоретичне прогнозування терміну служби рейок виконується на основі розрахунків їхнього ресурсу й вірогідності безвідмовної роботи за моделями формування відмови з використанням статистичних даних про інтенсивність зносу [3]. Розроблено методику прогнозування бічного зносу рейок при розрахунках їхнього залишкового ресурсу. При цьому використовується статистична інформація, яка накопичена в результаті моніторинга верхньої будови колії, та інформація експертів [4].

Існує також методика прогнозування довговічності рейок за критерієм виникнення внутрішніх контактно-втомних тріщин, що базується на застосуванні кінетичної теорії пошкоджуваності та моделей пружнопластичного деформування [5].

Другий підхід – прогнозування зміни профілів рейок внаслідок їхнього зносу – ґрунтується на математичному моделюванні взаємодії пари "колесо – рейка". Розробляються математичні моделі з використанням різних теорій контакту, моделей дотичних сил крипа, зносу пари тіл.

Наприклад, в роботі [6] виконано моделювання послідовного зносу рейок на Шведській вузькоколійній залізниці в Стокгольмі. Взаємодія колеса і рейки моделюється з використанням теорій контакту Герца та взаємодії Калкера.

Знос рейки визначається з використанням моделі Арчарда. Після розрахунків глибини зносу його розподіл згладжується і профіль рейки коригується. Процедура моделювання триває доти, поки не досягнутий заданий пропущений тоннаж. В результаті подібних досліджень можуть розроблятися нові, раціональні для заданих умов експлуатації, профілі рейок [7].

У статті, що представляється, розглянуто другий підхід – прогнозування зміни профілів головок рейок при теоретичному розв'язанні задачі взаємодії залізничних екіпажів і колії, моделюванні послідовного зносу рейок. Запропоновано спосіб прогнозування зносу рейок і зміни профілів їхніх головок з використанням наведеної в роботі [8] математичної моделі взаємодії колеса та рейки з розподіленими силами. Так само, як і для коліс, при визначенні параметрів зняття шару матеріалу з поверхні головки рейки під дією дотичних контактних сил використовується відомий закон зносу Шпехта [9], за яким існує лінійна залежність між питомим зносом m_v (масою матеріалу, що знімається) і роботою сили взаємодії, віднесеної до площі контакту.

Пляма контакту ділиться на малі елементи. У кожному елементі контакт розглядається як одноточковий, а дотичні елементарні сили вважаються силами крипа.

На k -ому елементі плями контакту питома потужність взаємодії dP_k дорівнює

$$dP_k = \frac{1}{dE_k}\left(\left|T_{xk}\varepsilon_{xk}\right| + \left|T_{yk}\varepsilon_{yk}\right|\right),$$

де dE_k – площа елемента плями; ε_{xk}, ε_{yk} – показники крипа у поздовжньому та поперечному напрямках; T_{xk}, T_{yk} – складові елементарних сил крипа.

Товщина зняття матеріалу при зносі визначається за формулою

$$h_k = \frac{1}{\rho dE_k} p_v dP_k \Delta t\ ,$$

де ρ – густина матеріалу; p_v – коефіцієнт пропорціональності; Δt – час взаємодії.

Профіль рейки коригується відніманням отриманої товщини зняття металу в елементі перерізу з ординати цього елементу

$$f_R^*(y_k) = f_R(y_k) - h_k\ ,$$

де $f_R(y_k)$ – функція, що описує профіль рейки.

Розроблений алгоритм прогнозування зносу рейок і зміни їхнього профілю грунтується на числовому інтегруванні системи диференціальних рівнянь, що описують просторові коливання залізничного екіпажа при русі по колії довільного окреслення в плані. Його структуру представлено на рис. 1.

Досліджуваний фрагмент мережі залізниць повинен належати одній поїздо-ділянці – фізичній ділянці залізничних колій з єдиними ваговими нормами вантажних поїздів, стабільними розмірами руху і єдиним видом тяги. Також задається категорія залізничної лінії, якій належить ділянка і від якої залежать параметри та умови експлуатації залізниці, допустима швидкість руху вантажних і пасажирських потягів, вантажонапруженість, що враховуються при прогнозуванні зносу.

В Україні і країнах СНД залізничні лінії за категоріями розподілені на швидкісні, особливо вантажонапружені, магістральні I-III категорій і залізничні лінії загальної мережі (IV категорії) [10]. Залежно від категорії при прогнозуванні задається розрахункова річна вантажонапруженість нетто ділянки у вантажному напрямі. Вантажонапруженість (густина вантажних залізничних перевезень) – це показник інтенсивності перевезень, який вимірюється у тонно-кілометрах (ткм) на 1 км в рік і визначається діленням виконаного вантажообігу в ткм на експлуатаційну довжину шляху. Наприклад, для залізничної магістральної лінії I категорії цей показник дорівнює (30 – 50) млн ткм/км.

Досліджувана ділянка колії має бути постійної кривизни й одного стану. Вивчається статистика її вантажонапруженості за даний період часу: перелік та кількість різних одиниць рухомого складу, що курсують по цій ділянці, та їхнє навантаження.

У припущенні, що рейки кожної нитки зношуються однаково по усій довжині досліджуваної ділянки колії, для кожного екіпажа із заданого переліку виконуються серії розрахунків його руху по цій ділянці з допустимою швидкістю. У кожному розрахунку профіль коліс вважається незмінним й однаковим для усіх колісних пар екіпажа. Отримані значення зносу рейки і втрати металу множаться на кількість розглянутих екіпажів, пропущених по ділянці за даний період часу, з урахуванням вагових коефіцієнтів, що відповідають ступеню зносу коліс. Зокрема, для випадку незношених коліс ваговий коефіцієнт найменший.

Потім профіль рейки коригується: проводиться зняття металу з його головки, після чого отриманий профіль згладжується. Далі розрахунок для кожного екіпажа повторюється при використанні зміненого профілю рейки і наступного зі списку профілів коліс, після закінчення якого профіль рейки знову коригується.

Подібні серії розрахунків виконуються для всіх екіпажів із заданого переліку. Об'єм розрахунків можна істотно скоротити, якщо екіпажі з однаковими ходовими частинами та близькими значеннями баз кузовів і навантаження (наприклад, піввагони, хопери, криті вагони і т. д.) об'єднати в одну групу.

Апробація розробленого математичного забезпечення проводилася для незношених рейок Р65 на прямій і круговій кривій ділянках колії. Розрахунки виконувалися для навантаженого піввагона із серійними візками моделі 18-100 та стандартними колесами з різним ступенем зносу обода: незношеними (товщина гребеня ТГ = 33 мм), малозношеними (ТГ = 31 мм), середньозношеними (ТГ = 29 мм) і сильнозношеними (ТГ = 27 мм).

Швидкісь екіпажа на прямій ділянці становила (80 – 100) км/год, в круговій кривій радіусу 300 м – 60 км/год. Діючі випадкові збурення побудовано на основі показань вагона-колієвимірювача, отриманих на ділянках коліі доброго стану [8].

На рис. 2 показано результати прогнозування послідовної зміни профілю рейки при зносі прямої ділянки колії – на рис. 2, а), зовнішньої рейки кругової кривої – на рис. 2, б). Для прямої наведено розрахункові профілі головок рейок с прокатом 0,5; 1,8 та 3,1 мм, для кривої – з боковим зносом 2,0; 5,0; 6,5 і 8 мм.

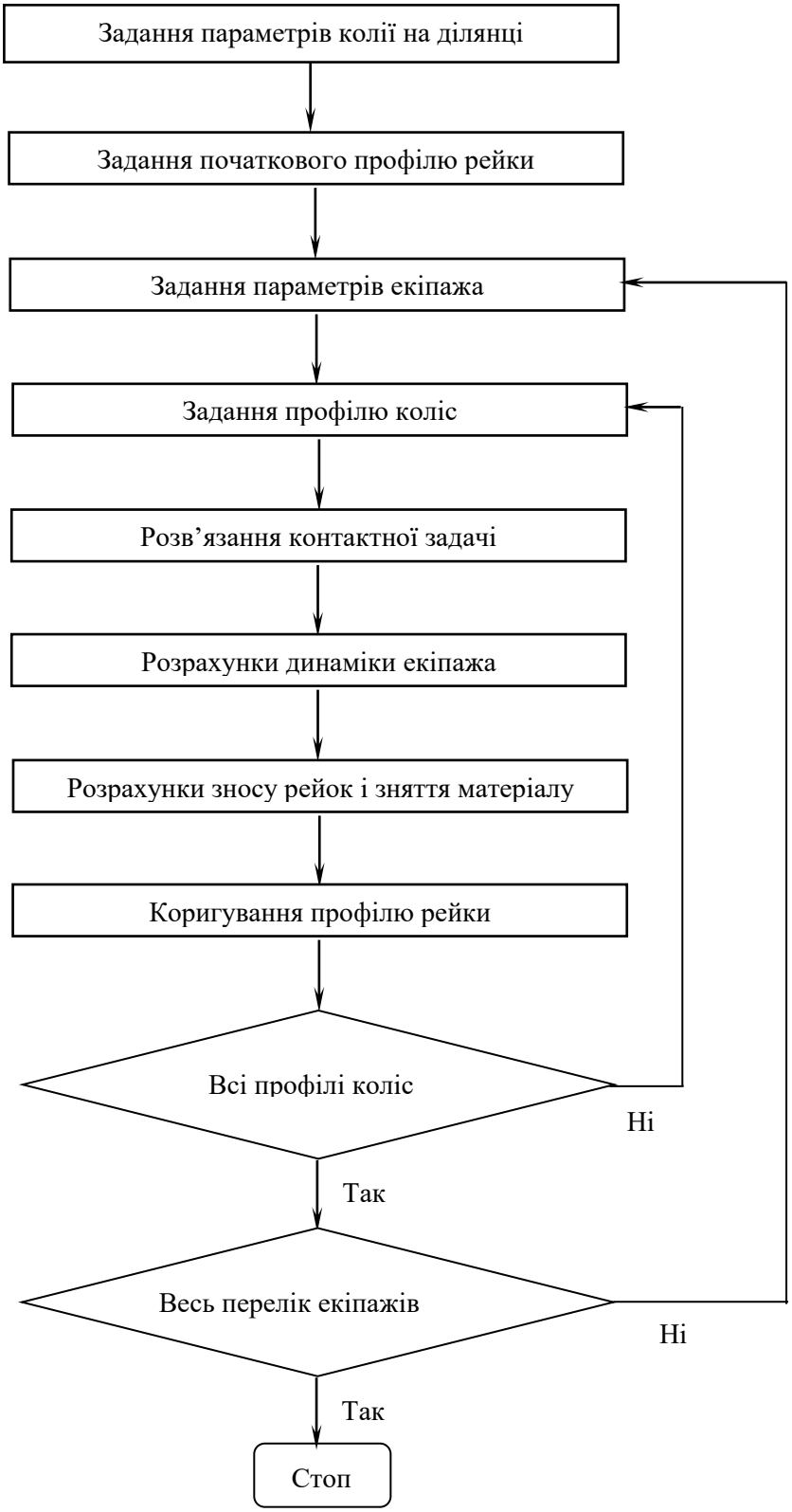
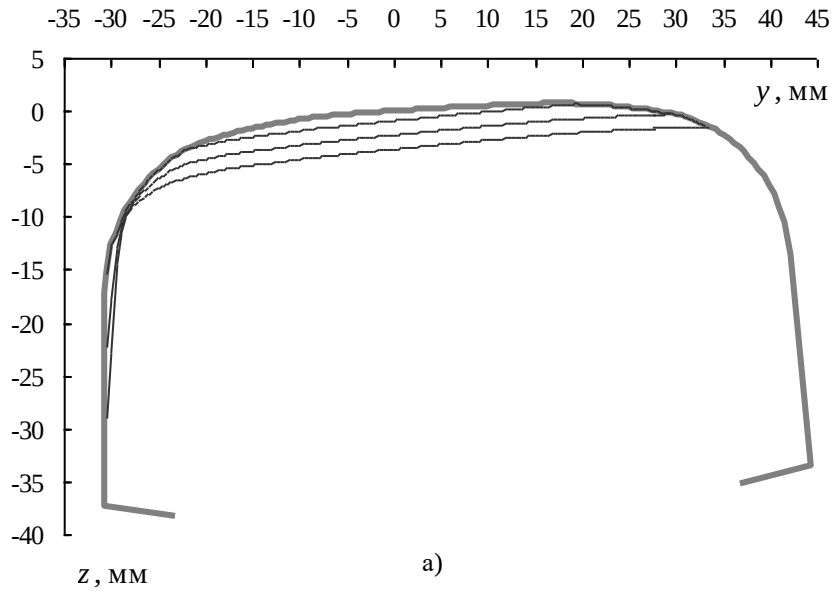
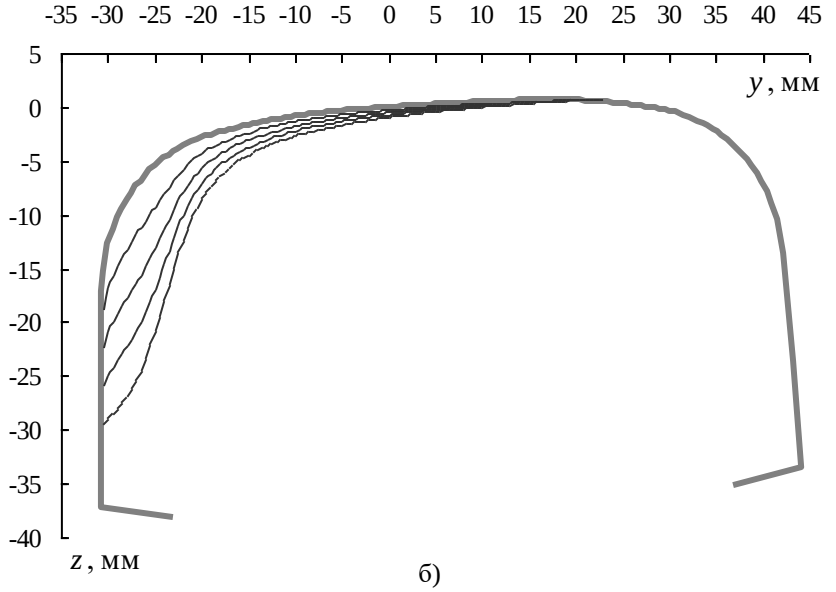

Задання параметрів колії на ділянці
Задання початкового профілю рейки
Задання параметрів екіпажа
Задання профілю коліс
Розв’язання контактної задачі
Розрахунки динаміки екіпажа
Розрахунки зносу рейок і зняття матеріалу
Коригування профілю рейки
Всі профілі коліс
Ні
Так
Весь перелік екіпажів
Ні
Так
Стоп

Рис. 1



а)

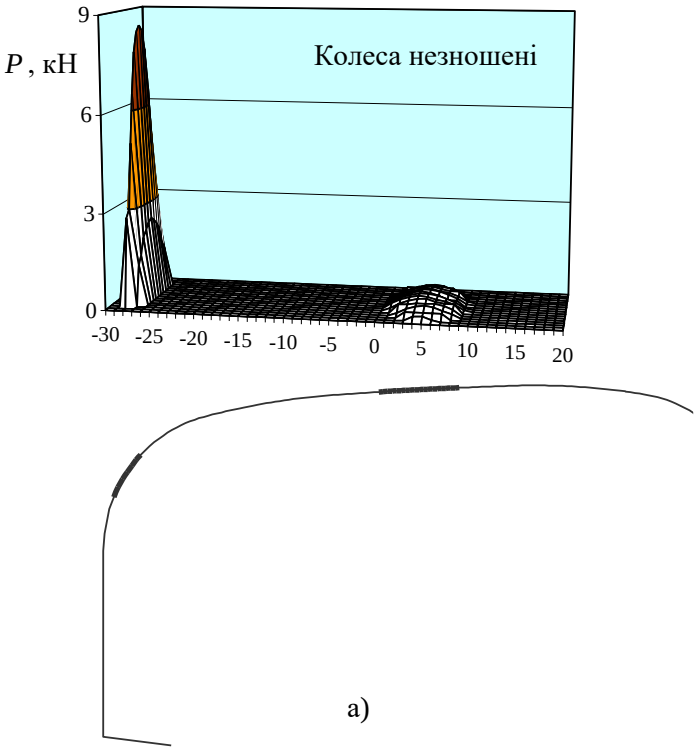


б)

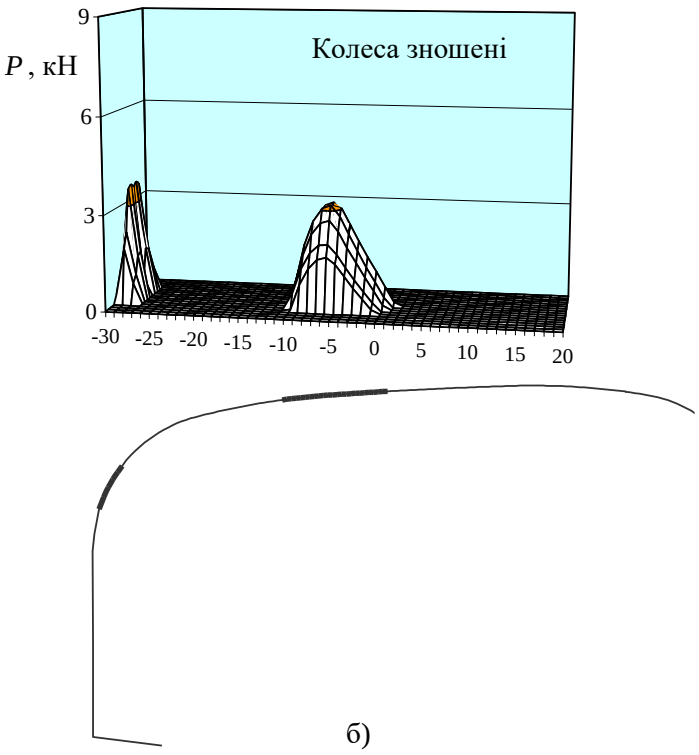
Рис. 2

Нижче наведено показники взаємодії даного екіпажа і колії, а також зносу головки зовнішньої рейки, отримані під час прогнозування при розрахунках вписування навантаженого вагона в кругову криву радіусу 300 м. Як приклад, обрано результати для випадку бокового зносу 2 мм у порівнянні з незношеними рейками.

На рис. 3, 4 показано розподіл на головці рейки вертикального тиску P, що передається від незношених (див. рис. 3, а), 4, а)) та сильнозношених (див. рис. 3, б), 4, б)) коліс при русі екіпажа зі швидкістю 60 км/год. Поверхні отримані при заданні профілів незношеної (див. рис. 3) та зношеної (див. рис. 4) зовнішніх рейок. Розташування контактних плям позначено на профілях головки товстими лініями.

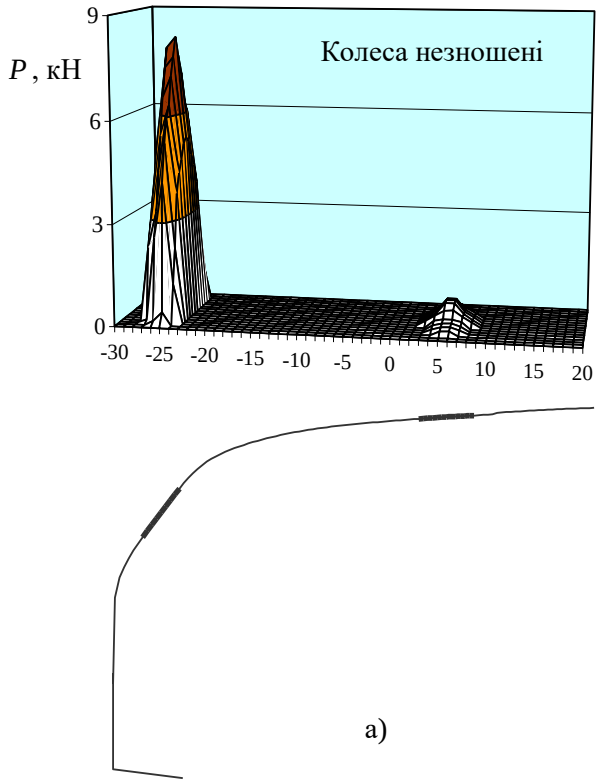

P , кН
9
6
3
0
Колеса незношені
-30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20

а)

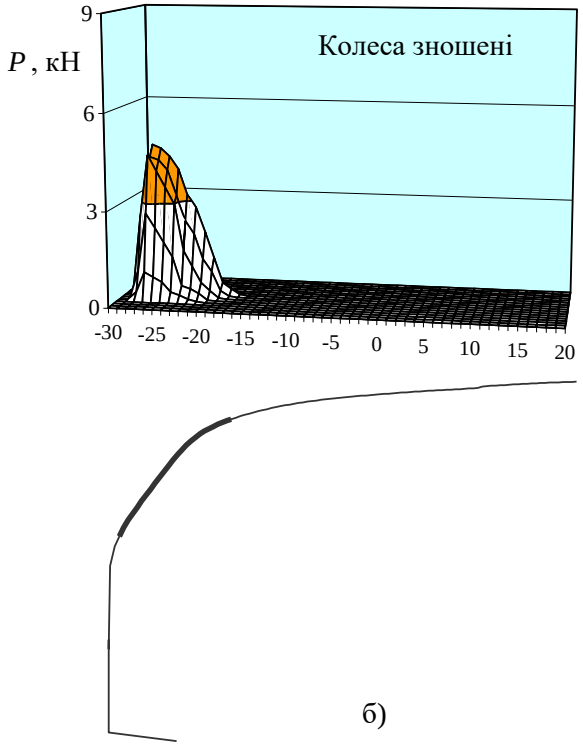

P , кН
9
6
3
0
Колеса зношені
-30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20

б)

Рис. 3


P , кН
Колеса незношені
9
6
3
0
-30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20

а)


P , кН
Колеса зношені
9
6
3
0
-30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20

б)

Рис. 4

Бачимо, що при взаємодії незношених рейок як з незношеними, так і зношеними колесами, а також зношених рейок з незношеними колесами мають місце дві плями контакту: на робочій викружці головки рейки (пляма контакту має малі розміри при високому тиску P); на вершині головки (пляма контакту більша за площею і, як правило, з невеликим тиском). У випадку зношених рейок і коліс взаємодія наближується до конформної: є одна контактна пляма, що має великі розміри, й максимальне значення P суттєво менше.

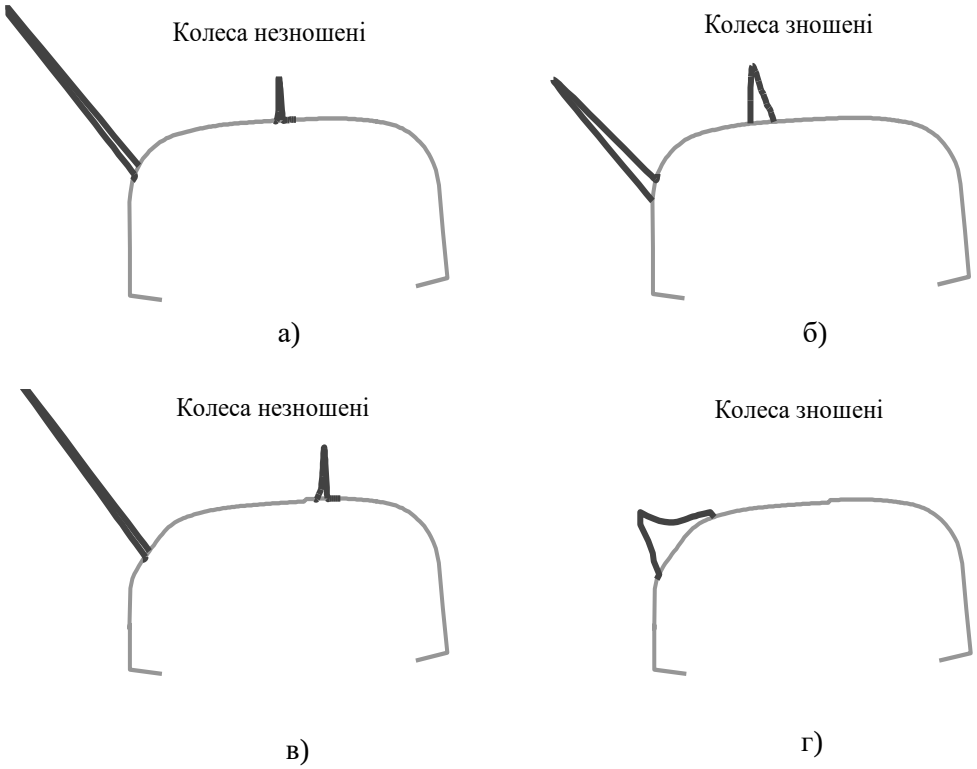
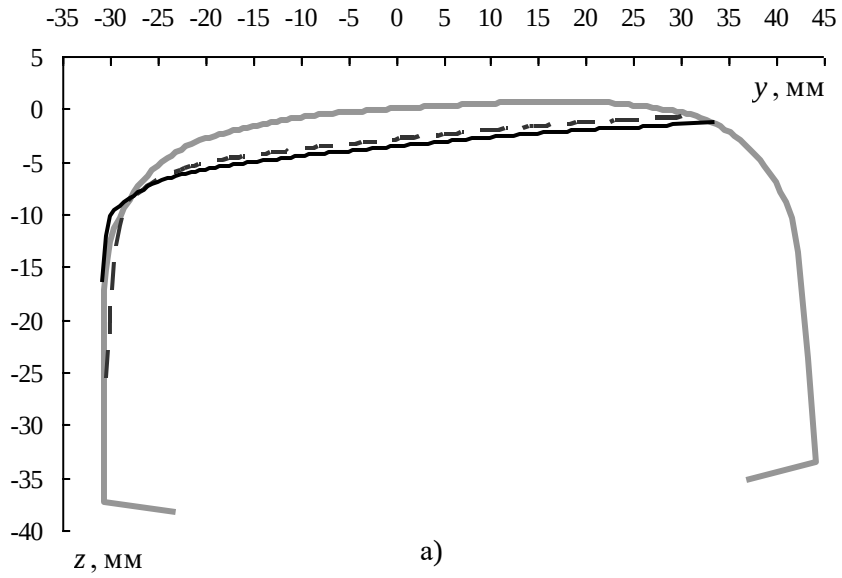


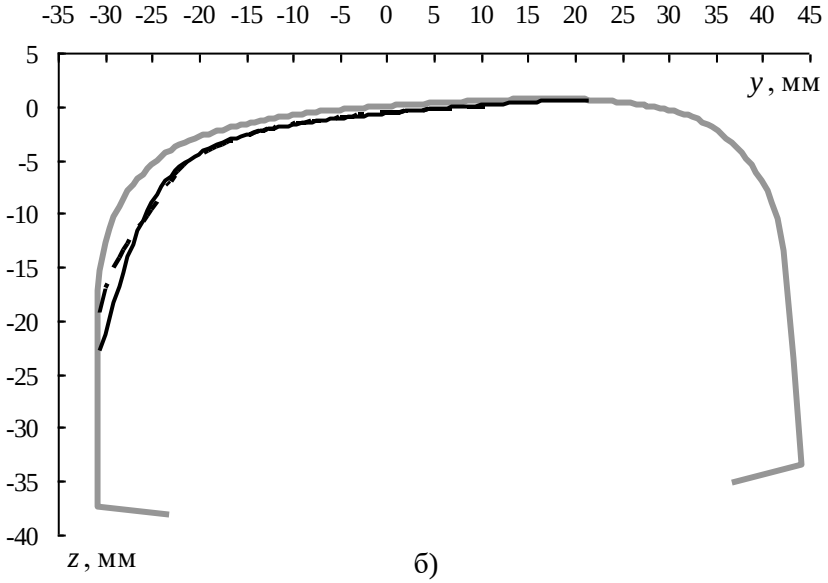
Рис. 5

На рис. 5 побудовано зведене до поперечного перерізу головки зовнішньої рейки розподілення показника зносу (питома, віднесена до пройденого шляху, робота сил тертя по робочій поверхні), яке наглядно показує інтенсивність зносу окремих зон головок рейок при взаємодії з колесами з різним профілем. У випадку, коли контакт пари «колесо – рейка» наближується до конформного (див. рис. 5, г)), зношуються бічна грань та робоча викружка головки.

Порівняння прогнозних кривих із даними натурних вимірювань наведено на рис. 6: для прямої ділянки – на рис. 6, а), для зовнішньої рейки кривої – на рис. 6, б). Профіль зношеної рейки для прямої ділянки був записаний на магістральній лінії Придніпровської залізниці на перегоні Нижньодніпровськ-Вузол – Ігрень, де швидкість руху поїздів становить 60 км/год і більше. Для криволінійної колії профіль рейки записувався на круговій кривій радіусу 300 м особливо вантажонапруженої дільниці Мукачеве – Чоп Львівської залізниці. Теоретичні криві нанесено штриховими лініями, експериментальні – суцільними.



а)



б)

Рис. 6

Як бачимо, отримано їх достатньо добрий збіг.

Висновок. Запропоновано спосіб прогнозування зносу рейок і зміни профілів їх головок з використанням математичної моделі взаємодії колеса та рейки з розподіленими по плямах контакту силами.

Виконане порівняння прогнозних і експериментальних даних свідчить, що запропонований спосіб дозволяє досить точно прогнозувати зміни форми профілів головок рейок при зносі в результаті експлуатації.

1. *Начигин В. А.* Контроль бокового износа рельсов. URL: http://scbist.com/xx1/17270-02-2010-kontrol-bokovogo-iznosa-relsov.html

2. *Шакина А. В, Биленко С. В., Фадеев В. С., Штанов О. В.* Исследование механизмов изнашивания рельсов в криволинейных участках пути на примере Дальневосточной железной дороги. Фундаментальные исследования. 2013. № 4–5. С. 1103–1108.
3. *Карпущенко Н. И., Величко Д. В., Антерейкин Е. С.* Анализ процессов нарастания износа рельсов и их ресурса в кривых участках пути. Наука и транспорт. 2012. № 3. С. 48–51.
4. *Краковский Ю. М., Начигин В. А.* Прогнозирование бокового износа рельсов как процедура оценки их остаточного ресурса. Контроль. Диагностика. 2010. № 6. С. 32–37.
5. *Косарчук В., Агарков А.* Прогнозирование долговечности рельсов по критерию возникновения трещин контактной усталости. Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2012. Вип. 20. С. 77–90.
6. *Orvnas A.* Simulation of rail wear on the Swedish light rail line Tvarbanan. Thesis on Master of Science degree. Royal Institute of Technology, Stockholm. 2005. 58 p.
7. *William J. H., Ebersöhn W., Lundgren J., Tournay H., Zakharov S.* Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues. USA: International Heavy Haul Association. 2001. 482 p.
8. *Ушкалов .В. Ф., Мокрий Т. Ф., Малышева И. Ю.* Математическая модель взаимодействия железнодорожного экипажа и пути с учетом распределения контактных сил по пятнам контакта. Техническая механика. 2015. № 2. С. 79–89.
9. *Шпехт В.* Новые данные об износе колес грузовых вагонов. Железные дороги мира. 1988. № 10. С. 11–19.
10. ДСТУ 3587-97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. Чинний від 1998-01-01. URL: https://kyivaudit.gov.ua>company.nsf.

Отримано 01.07.2019,
в остаточному варіанті 11.09.2019