УДК 629.7 https://doi.org/10.15407/itm2021.04.129

Т. Ф. МОКРІЙ, І. Ю. МАЛИШЕВА, Н. В. БЕЗРУКАВИЙ, І. М. ЛАДИГІН

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНТАКТНОЇ ПАРИ «КОЛЕСО–РЕЙКА» ДЛЯ ПОКРАЩАННЯ УМОВ ВЗАЄМОДІЇ З КОЛІЄЮ ЗАЛІЗНИЧНИХ ЕКІПАЖІВ З ПІДВИЩЕНИМ ОСЬОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
ул. Лєшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: mokriyt@gmail.com

Сьогодні у світі все ясніше простежуються тенденції розвитку залізничного транспорту у напрямку підвищення осьових навантажень вантажних вагонів, що дає значний економічний ефект. При цьому відіграє роль не лише конструкція вагона, але й коефіцієнт вантажопідйомності: чим вище цей коефіцієнт, тим економічно ефективніше використання вагона. Тому один з пріоритетних напрямків в освоєнні зростаючих об'ємів перевезень вантажів і підвищенні ефективності роботи світових залізниць – це збільшення вагових норм вантажних потягів. Для підготовки мережі залізниць до пропуску вагонів з підвищеними осьовими навантаженнями потрібна розробка заходів по зниженню деформованості колії, зокрема, підбір відповідних профілів коліс і рейок.

Мета роботи полягала у розробці рекомендацій щодо удосконалення контактної пари «колесо–рейка» для покращання умов вписування залізничних екіпажів з підвищеним осьовим навантаженням у криволінійні ділянки колії вітчизняних залізниць. У цій статті наведено розроблений зносостійкий профіль головки рейки R-ITM. Вивчено вплив нового профілю на процеси взаємодії з колією різних вантажних вагонів при розрахунках їх вписування з постійною швидкістю в криву радіуса 300 м. При цьому особлива увага приділялася взаємодії з колією вантажного вагона нового покоління з візками моделі 18-9817 з підвищеним до 25 тс осьовим навантаженням.

Виконані дослідження дозволили сформулювати такі рекомендації: для покращання умов вписування у криволінійні ділянки колії залізничних екіпажів з підвищеним осьовим навантаженням, зниження негативного впливу на колію та збільшення рівня безпеки руху рекомендовано використання нових розроблених профілів контактної пари: у вагонах – профілів ободів коліс ITM-73-03; на колії – профілів головок зовнішніх рейок R-ITM та головок внутрішніх стандартних рейок Р65.

Ключові слова: *профіль головки рейки, вантажний вагон з підвищеним осьовим навантаженням, вписування у криволінійні ділянки колії, удосконалення контактної пари «колесо–рейка».*

At present, one of the global trends in railway transport development, which becomes clearer and clearer, is increasing the axle load of freight cars, which gives a considerable economic benefit. In this connection, of importance is not only the car design, but also the car capacity utilization factor: the higher this factor, the more economically efficient the car use. Because of this, one of the priority global lines in increasing the volume of fright traffic and the railway operation efficiency is increasing the carrying capacity of freight cars. Preparing the railways for cars with increased axle loads calls for the development of measures to decrease the track deformability, in particular by choosing appropriate wheel and rail profiles.

The aim of this work was to develop recommendations on refining the wheel–rail contact pair to improve curve negotiation by railway vehicles with an increased axle loads on the Ukrainian railways. This paper presents the proprietary R-ITM wear-resistant railhead profile. The effect of the new profile on wheel–rail interaction in negotiating a curve of radius 300 m at a constant speed was studied for different cars. In doing so, emphasis was on wheel–rail interaction for a new-generation freight car on 18-9817 trucks with an axle load increased to 36 tf.

The studies conducted made it possible to formulate the following recommendations: to improve curve negotiation by railway vehicles with increased axle loads, reduce the adverse effect on the track and improve traffic safety, new proprietary contact pair profiles are recommended: the ITM-73-03 wheel profile for cars, and the R-ITM railhead profile for outer rails together with the standard R65 railhead profile for inner rails.

Keywords: *railhead profile, freight car with an increased axle load, curve negotiation, rail–wheel contact pair refinement.*

Сьогодні у світі все ясніше простежуються тенденції розвитку залізничного транспорту у напрямку збільшення осьових навантажень вантажних вагонів. Підвищення осьових навантажень дає значний економічний ефект: їх збільшення від 22,5 тс до 30,5 тс знижує витрати на перевезення на 40 % [1]. При цьому відіграє роль не лише конструкція вагона, але й коефіцієнт вантажопідйомності (відношення вантажопідйомності до маси тари). Чим вище цей коефіцієнт, тим економічно ефективніше використання вагона. В результаті реалізації такого підходу коефіцієнт вантажопідйомності у багатьох кра-

їнах зріс з 2,4 до 5,8. Тому один з пріоритетних напрямків в освоєнні зростаючих об'ємів перевезень вантажів і підвищенні ефективності роботи світових залізниць – це збільшення вагових норм вантажних потягів.

Нині осьове навантаження чотиривісних і двовісних вагонів на залізницях України та країн СНД складає в основному не більше 23,5 тс, тоді як на залізницях Північної Америки, Австралії і Південної Африки широко експлуатуються вантажні вагони з осьовими навантаженнями (30–40) тс [2]. У Швеції також побудований і пройшов випробування новий критий вагон вантажопідйомністю 93 тонни при осьовому навантаженні 30 тс для перевезення сталі в рулонах і зливках [1].

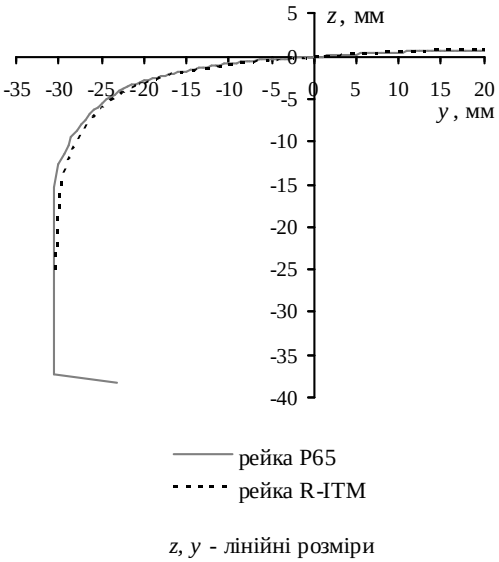
В Росії розроблена низка вантажних вагонів, спеціально спроєктованих під осьове навантаження 25 тс, які встановлюють на візки моделі 18-9855, побудовані на АТ «Тихвінський вагонобудівний завод» [3].

В Україні розроблені і прийняті як базові для перспективних вантажних вагонів візки моделі 18-9817 з осьовим навантаженням 25 тс [4]. Дослідні зразки цих візків пройшли повний комплекс ходових приймальних випробувань, на підставі результатів яких було прийнято рішення про виготовлення дослідної партії піввагонів з цими візками і проведення експлуатаційних випробувань. В Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) з метою зниження гребеневого зносу коліс для цих вагонів розроблений зносостійкий профіль коліс ІТМ-73-03 [5].

Для підготовки мережі залізниць до пропуску вагонів з підвищеними осьовими навантаженнями потрібна розробка заходів по зниженню деформованості колії, зокрема, підбір відповідних профілів коліс і рейок [6, 7]. В даній роботі представлений профіль головки рейки, розроблений для покращання умов вписування таких вагонів у криволінійні ділянки колії на вітчизняних залізницях.

На базі стандартної рейки Р65 побудовано сімейство профілів головок зовнішніх рейок кривої. Вирішувалася просторова задача контакту коліс і рейок з побудованими профілями, аналізувалися параметри взаємодії, у тому числі розміри і положення контактних плям. Виконувалися розрахунки вписування даного вагона у кругову криву малого радіуса (300 м). При аналізі отриманих результатів серед побудованих профілів проводився вибір за критерієм гребеневого зносу коліс. Показники зносу обчислювалися як питома, віднесена до пройденого шляху, робота сил тертя по робочій поверхні ободу колеса. Вибраному профілю головки рейки присвоєна назва R-ІТМ. Його порівняння з профілем стандартної рейки Р65 приведене на рис. 1.

Розподілення вертикального тиску по плямах контакту на набіжних колесах при вписуванні навантаженого вагона в криву радіуса 300 м наведено на рис. 2. Як бачимо, при використанні в кривій зовнішньої рейки з розробленим профілем R-ІТМ головки її взаємодія з гребенем та галтеллю колеса стає конформною зі значно зниженим тиском.



z, *y* - лінійні розміри

Рис. 1

Вивчено вплив розробленого профілю головки рейки на процеси взаємодії з колією різних вантажних вагонів при розрахунках їх вписування з постійною швидкістю в дану криву. При цьому особлива увага приділялася взаємодії з колією вантажного вагона з візками моделі 18-9817 та підвищеним до 25 тс осьовим навантаженням. Вважалося, що головка внутрішньої рейки кривої має стандартний профіль Р65.

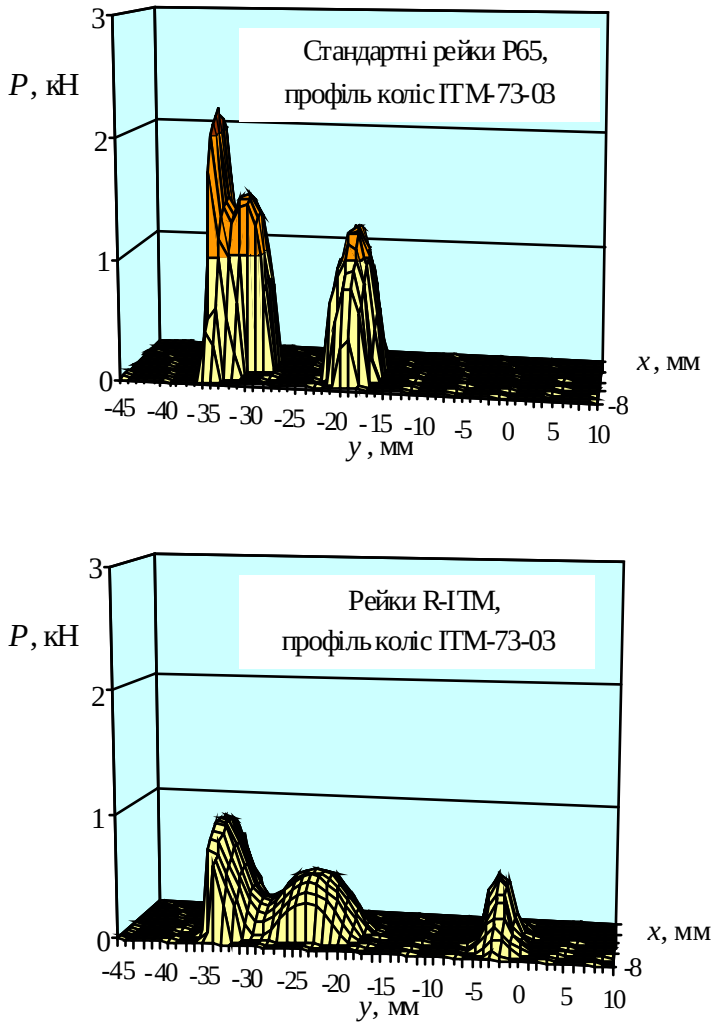


Рис. 2

Залежності максимальних значень показника гребеневого зносу *A* набіжних коліс від швидкості руху даного навантаженого вагона приведені на рис. 3. Для порівняння нанесені результати, отримані при установці у візках колісних пар зі стандартним профілем коліс. Терміном «гребеневий знос» тут і далі позначений знос галтелі і гребеня колеса.

При установці у візках коліс із профілем ІТМ-73-03, замість стандартних, при русі екіпажа по кривій зі стандартними рейками Р65 гребеневий знос набіжних коліс зменшується у 3 рази. Якщо ж вагон вписується в криву, зовнішня рейка якої обточена за розробленим профілем R-ITM, то показник *A* знижується ще у (3 – 5) разів і стає меншим, ніж у випадку взаємодії стандартної пари «колесо–рейка», у (9 – 15) разів.

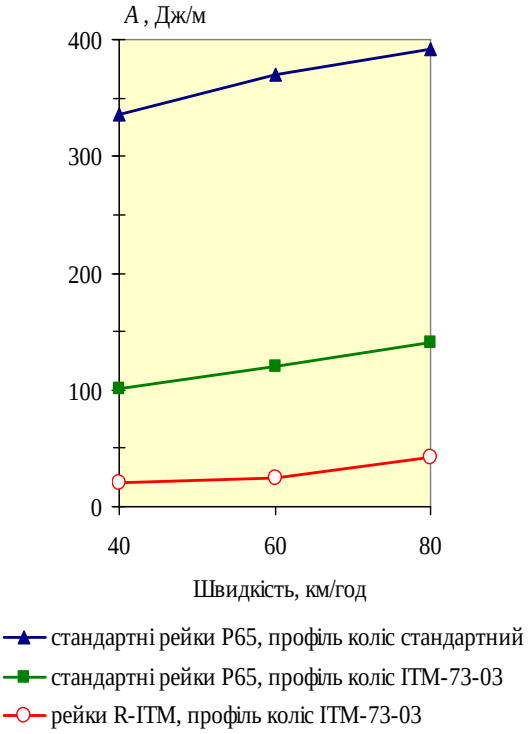


Рис. 3

На рис. 4 наведено розподілення зносу по робочій поверхні набіжного колеса досліджуваного вантажного вагона при його вписуванні зі швидкістю 60 км/год в кругову криву радіуса 300 м. Видно, що стандартна пара «колесо–рейка» має двоточковий контакт з розташуванням однієї з плям малої площі на гребені при великому зносі. При використанні коліс зі спеціально розробленим для таких вагонів профілем ІТМ-73-03 контактна пляма переміщується на галтель і має досить велику площу, що викликає значне зниження зносу. Якщо в кривій укладена зовнішня рейка з новим профілем R-ITM, то контакт стає конформним і в результаті знос стає дуже малим.

Таким чином, при використанні розробленого профілю R-ITM для обточування зовнішньої рейки кривої створюються сприятливі умови для взаємодії вантажного вагона з підвищеним навантаженням на вісь та колії при малому гребеневому зносі.

Аналіз впливу розробленого профілю головки зовнішньої рейки на взаємодію інших вантажних вагонів із колією має суттєве значення. Виконано розрахунки вписування в криву радіусом 300 м двох екіпажів зі стандартним осьовим навантаженням 23,5 тс: вагона нового покоління з візками моделі 18-7020 і профілем коліс ІТМ-73 та серійного вагона зі стандартними візками моделі 18-100. В табл. 1 приведені максимальні значення гребеневого зносу набіжних коліс, отримані при розрахунках вписування вагонів у криву зі швидкістю 60 км/год.

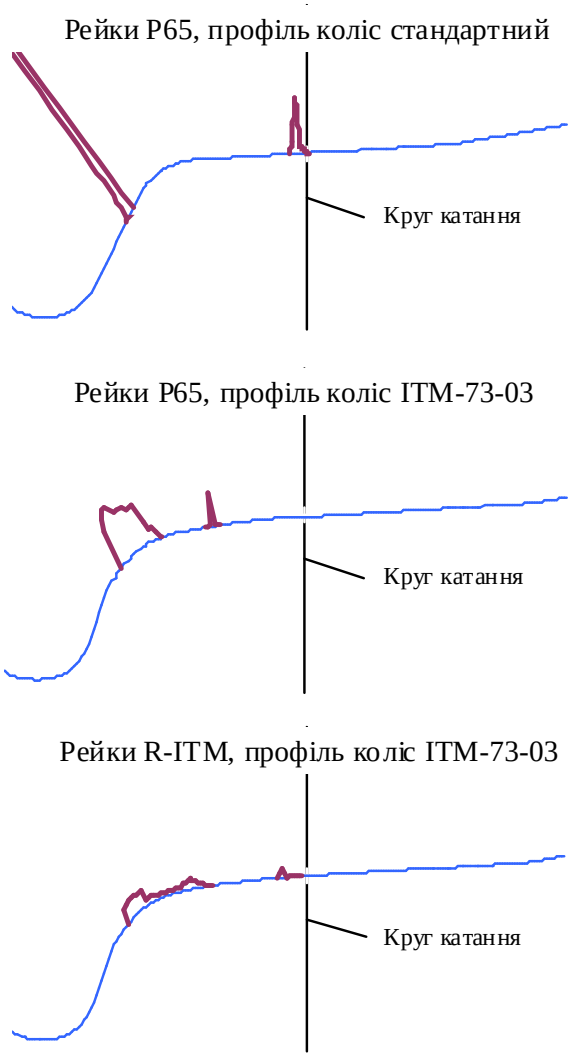


Рис. 4

Табл. 1 – Максимальні значення гребеневого зносу, Дж/м

Екіпаж	Зовнішня рейка	
	Р65	R-ІТМ
Вагон нового покоління з візками 18-9817 (осьове навантаження 25 тс, профіль коліс ІТМ-73-03)	120	25
Вагон нового покоління з візками 18-7020 (осьове навантаження 23,5 тс, профіль коліс ІТМ-73)	131	120
Вагон зі стандартними візками 18-100 (осьове навантаження 23,5 тс, профіль коліс стандартний)	375	370

Як бачимо, при укладенні зовнішньої рейки з новим профілем головки R-ІТМ замість стандартної Р65 гребеневий знос коліс розглянутих екіпажів зі стандартним осьовим навантаженням залишається практично незмінним (серійний вагон) або трохи зменшується (9 % – вагон з візками 18-7020). Цей показник вагона з підвищеним до 25 тс навантаженням (візки моделі 18-9817) знижується майже у 5 разів і стає набагато меншим, ніж у інших розглянутих вагонів.

Для повнішого аналізу взаємодії контактної пари «колесо–рейка» проведено розрахунки за визначенням її пружно-деформованого стану (ПДС) за допомогою методу скінченно-елементного аналізу. Для оцінки ПДС в зоні контакту колеса і рейки використовуються усічені розрахункові схеми залізничних екіпажів. Вибір такої усіченої схеми пояснюється тим, що найбільші зусилля при русі екіпажа в кривих ділянках колії передаються на колію через гребені набіжних на зовнішні рейки коліс. Так, при русі екіпажа в кривих з радіусом менше за (600 – 800) м гребені деяких коліс притиснуті до зовнішньої рейки майже на всьому протязі кривої. Тобто моделювання взаємодії екіпажа і колії зводиться до визначення ПДС в колесі і рейці при їх взаємному зміщенні Δy в межах зазору Δx. На рис. 5 показано вихідне положення контактної пари.

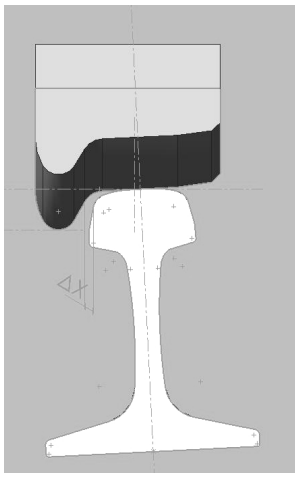


Рис. 5

Оскільки дана модель включає контактуючі поверхні, які в процесі навантаження можуть входити або виходити з контакту (тобто в загальному випадку вирішується нелінійне завдання теорії пружності), то виникає необхідність в ретельному описі умов функціонування усіх складових в цілому і контактуючих пар поверхонь зокрема. Тому для аналізу ПДС вибрано схеми дискретизації приблизно з 52000 об’ємними скінченними елементами і 75000 вузлами (рис. 6).

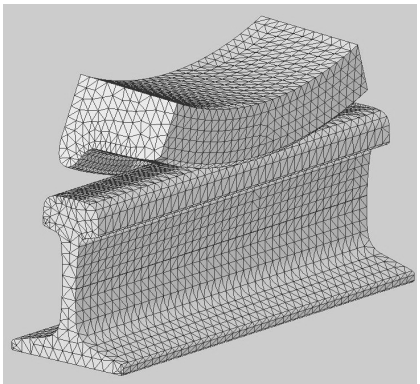
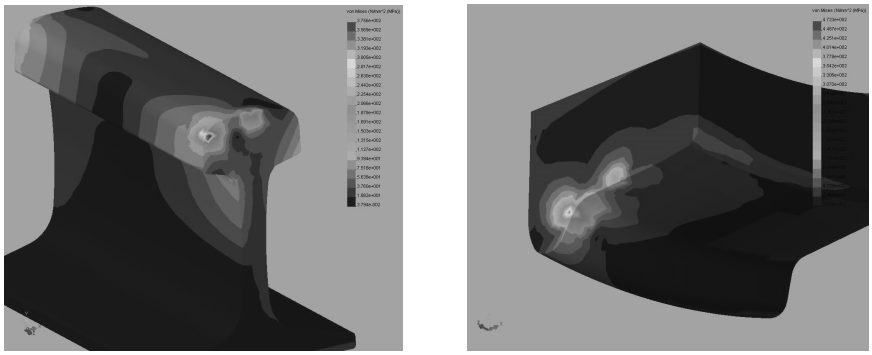


Рис. 6

Еквівалентне напруження в точках контакту пари «колесо–рейка» розраховувалось за критерієм Мізеса. На рис. 7, для приклада, показано епюри напруги для рейки R-ІТМ (рис.7, а)) і обода колеса ІТМ-73-03 (рис.7, б)) при зміщенні ко-

леса відносно рейки в поперечному напрямі, що відповідає торканню гребенем обода колеса головки рейки.



а) б)

Рис. 7

Максимальні значення напруження в бічній грані головки зовнішньої рейки при русі різних вантажних вагонів в кривій з рейками Р65 і R-ITM приведено в табл. 2.

Табл. 2 – Максимальні значення напруження, МРа

Екіпаж	Зовнішня рейка	
	Р65	R-ITM
Вагон нового покоління з візками 18-9817 (осьове навантаження 25 тс, профіль коліс ІТМ-73-03)	210	85
Вагон нового покоління з візками 18-7020 (осьове навантаження 23,5 тс, профіль коліс ІТМ-73)	220	103
Вагон зі стандартними візками 18-100 (осьове навантаження 23,5 тс, профіль коліс стандартний)	370	310

Як бачимо, у всіх розглянутих варіантах руху вагонів використання рейок з запропонованим профілем головок R-ITM приводить до зниження напруження в їх бічних гранях, особливо суттєво при контакті з колесами, що мають профіль ІТМ-73 (в 2 рази) і ІТМ-73-03 (в 2,5 рази). Найбільша інтенсивність напруження виникає на бічному закругленні рейки Р65 при взаємодії зі стандартним колесом.

Висновок: Виконані дослідження щодо удосконалення контактної пари «колесо–рейка» дозволили сформулювати такі рекомендації.

Для покращання умов вписування у криволінійні ділянки колії залізничних екіпажів з підвищеним осьовим навантаженням, зниження негативного впливу на колію та збільшення рівня безпеки руху рекомендовано використання нових розроблених профілів контактної пари: у вагонах – профілів ободів коліс ІТМ-73-03; на колії – профілів головок зовнішніх рейок R-ITM та головок внутрішніх рейок Р65.

1. Тенденции развития современного вагоностроения. URL: http://scbist.com/wiki/18428-tendencii-razvitiya-sovremennogo-vagonostroeniya.html (дата звернення 08.08.17).
2. *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.

3. *Бороненко Ю., Третьяков А., Зимакова М.* Оценка возможности и эффективности повышения осевых нагрузок грузовых вагонов. Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2017. № 1. С. 32–37.
4. Тележка двухосная 18-9817 с нагрузкой от колесной пары на рельс 25 тс. URL: http://okb.at.ua/publ/telezhka_dvukhosnaja_modeli_18_9817_s_nagruzkoj_ot_kolesnoj_pary_na_relsy_25t/1-1-0-6 (дата звернення 23.12.16).
5. *Ушкалов В. Ф., Мокрий Т. Ф., Малышева И. Ю., Безрукавый Н. В.* Износостойкий профиль колеса для грузового вагона с повышенной осевой нагрузкой. Технічна механіка. 2018. № 1. С. 20–29. https://doi.org/10.15407/itm2018.01.020
6. *Magel E., Tajaddini A.* Оптимизация профилей колес и рельсов. Железные дороги мира. 2007. № 10. С. 62–64.
7. *Zakharov S., Goryacheva I., Bogdanov V., Pogorelov D., Zharov I.* Problems with Wheel and Rail Profiles Selection and Optimization. Wear. 2008. V. 265. P. 1266–1272. https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.026

Отримано 16.11.2021,
в остаточному варіанті 01.12.2021