

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

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗНОСУ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ ПАРИ
«КОЛЕСО–РЕЙКА» НА КОЛИВАННЯ ВАГОНА З ПІДВИЩЕНИМ
ОСЬОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ***Інститут технічної механіки**Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
ул. Лещико-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: mokriyt@gmail.com*

В даний час практично в усіх країнах світової спільноти розробляються і здійснюються заходи, спрямовані на підвищення конкурентоспроможності та ефективності залізниць. Одним з пріоритетних напрямків є підвищення вагових норм вантажних поїздів. В Україні розроблено та прийнято за базові для вантажних вагонів нового покоління перспективні візки моделі 18-9817 з навантаженням на вісь 25 тс. Для цих вагонів розроблено зносостійкий профіль коліс ІТМ-73-03 з товщиною гребеня 32 мм.

Мета роботи полягала в дослідженнях впливу зміни форми профілів ободу коліс і головок рейок у процесі експлуатації на просторові коливання такого вантажного вагона.

У статті, що представляється, оцінено вплив зміни форми профілів коліс і головок рейок у процесі експлуатації на стійкість руху та динамічні якості даного вагона. Виконано прогнозування зносу коліс із новим профілем з використанням алгоритму розв'язання геометричної задачі взаємодії з урахуванням взаємних горизонтальних поперечних зміщень колеса і рейки, кутів набігання на рейку та бічної хитаючої колісної пари, а також нелінійності контактуючих поверхонь і можливості виникнення їх конформного контакту. Проведено розрахунки просторових коливань вагона при русі по прямих та кругових кривих ділянках колії.

Показано, що зміна форми профілів ободу коліс та головок рейок при їх зносі мало впливає на характеристики руху вантажного вагона нового покоління з перспективними візками 18-9817 з підвищеним осьовим навантаженням і розробленим зносостійким профілем коліс ІТМ-73-03. Стійкість руху і динамічні якості екіпажа залишаються на високому рівні. Застосування вказаного вантажного вагона на залізницях України цілком відповідає задачам оновлення вітчизняного рухомого складу: підвищення динамічних якостей екіпажів, збільшення ресурсу ходових частин, зниження зносу елементів рухомого складу та колії.

Ключові слова: оновлення рухомого складу, вантажний вагон нового покоління, перспективний візок із підвищеним осьовим навантаженням, знос контактної пари «колесо–рейка», стійкість руху та динамічні якості.

At present, nearly all countries of the world develop and implement measures aimed to increase the competitiveness and efficiency of their railways. One of the priority lines is to increase the carrying capacity of freight trains. In Ukraine, 18-9817 trucks of axle load 25 tf were developed and adopted as basic ones for new-generation freight cars, and the ITM-73-03 wear-resistant wheel profile of flange thickness 32 mm was developed for them too.

The aim of this paper is to study the effect of in-service variation in the wheel and rail profile shape on the spatial oscillations of a freight car with 18-9817 trucks and the ITM-73-03 wheel profile.

The paper estimates the effect of in-service variation in the wheel and rail profile shape on the dynamic stability and ride performance of the car under consideration. The wear of wheels with the new profile is predicted by solving the geometrical problem of wheel–rail interaction with account for the mutual horizontal lateral displacements of the wheel and the rail, the wheelset angle of attack and angle of roll, the nonlinearity of the contacting surfaces, and the possibility of their conformal contact. The results of calculation of the spatial oscillations of the car in tangents and curves are presented.

It is shown that wear-caused variation in the wheel and rail profile shape has little effect of the dynamic performance of a new-generation freight car with 18-9817 trucks with an increased axle load and the ITM-73-03 wear-resistant wheel profile, its dynamic stability and ride performance remaining at a high level. The use of the above car on the Ukrainian railways fully meets the objectives of home rolling stock renewal: vehicle ride performance improvement, running gear life extension, and vehicle and track wear reduction.

Keywords: rolling stock renewal, new-generation freight car, prospective truck with increased axle load, wheel–rail contact pair wear, dynamic stability, ride performance.

Постійне оновлення і вдосконалення транспортного комплексу, його технологічне переозброєння є найважливішими умовами економічного розвитку будь-якої країни [1]. В даний час практично в усіх країнах світової спільноти розробляються і здійснюються заходи, спрямовані на підвищення конкурентоспроможності та ефективності залізниць [2, 3]. Одним з пріоритетних напрямків є підвищення вагових норм вантажних поїздів і в останні роки

© В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрій, І. Ю. Малишева, Н. В. Безрукавий, 2020

Техн. механіка. – 2020. – № 4.

зростає обсяг замовлень на спеціалізовані вагони великої вантажопідйомності та місткості [4, 5].

В Україні розроблені та прийняті за базові для вантажних вагонів нового покоління перспективні візки моделі 18-9817 з навантаженням на вісь 25 тс [6]. Виконані раніше теоретичні дослідження показали, що через підвищену зсувну жорсткість цих візків істотно зростає стійкість руху вагона, але в той же час ускладнюється його вписування в криволінійні ділянки колії, внаслідок чого помітно збільшується знос коліс. Тому для вантажних вагонів з цими візками був розроблений зносостійкий профіль коліс ІТМ-73-03 з товщиною гребеня 32 мм [7].

У статті, що представляється, оцінено вплив зміни форми профілів коліс і головок рейок у процесі експлуатації на стійкість руху та динамічні якості такого вагона. Виконано прогнозування зносу коліс із новим профілем з використанням алгоритму розв'язання геометричної задачі взаємодії з урахуванням взаємних горизонтальних поперечних зміщень колеса і рейки, кутів набігання на рейку та бічної хитаவிці колісної пари, а також нелінійності контактуючих поверхонь і можливості виникнення їх конформного контакту [8]. Проведено розрахунки просторових коливань піввагона при русі по прямих та кругових кривих ділянках колії. З метою прискорення прогнозування розглядався вагон, завантажений до повної вантажопідйомності.

Вважалося, що обід колеса зношується рівномірно по своєму периметру. Профіль ободу розбивався на малі сегменти завдовжки 0,5 мм, на яких на кожному кроці інтегрування за часом відбувалося накопичення зносу.

У припущенні, що профіль коліс незмінний, виконувалися серії розрахунків коливань екіпажа на прямій ділянці колії з незношеними рейками та круговій кривій ділянці радіусу 300 м з незношеними і малозношеними рейками Р65. Швидкість руху складала: на прямій ділянці (90 – 120) км/год, на криволінійній – (60 – 80) км/год. Після закінчення кожної серії розрахунків проводилося зняття металу з ободу колеса. Для скорочення об'єму обчислень перед зняттям металу виконувалася екстраполяція отриманої епюри зносу до величини 0,1 мм. Потім профіль коригувався відніманням отриманої висоти зняття металу з подальшим згладжуванням. З використанням отриманого профілю проводилася наступна серія розрахунків, після закінчення якої він знову коригувався. Така процедура повторювалася до досягнення заданої товщини гребеня зношеного колеса.

Зпрогнозовано знос колеса до товщини гребеня 31 мм (малий знос), 29 мм (середній знос) та 27 мм (сильний знос). Крім того, у розрахунках задавався профіль гранично зношеного колеса (товщина гребеня 25 мм), записаний у випробуваннях, оскільки виконані вимірювання показали, що при граничному зносі в експлуатації профіль колеса стає однаковим незалежно від початкового профілю обточування.

Профіль зношеної рейки для прямої ділянки було обрано серед записів, зроблених на магістральній лінії Придніпровської залізниці на перегоні Нижньодніпровськ-Вузол – Ігрені, де швидкість руху поїздів становить 60 км/год і більше.

Вплив зміни при зносі форми профілів поверхні ободів коліс і головок рейок на стійкість руху піввагона з візками 18-9817 вивчався за результатами розрахунків його руху з постійною швидкістю по прямих ділянках колії відмінного стану з незношеними та зношеними рейками. Оцінювалися середньоквадратичні відхилення (СКВ) поперечних прискорень елементів конструкції вагона. На рис. 1 показані залежності СКВ поперечних прискорень п'ятників кузова $\sigma(\ddot{y}_\Pi)$ в долях прискорення вільного падіння g від швид-

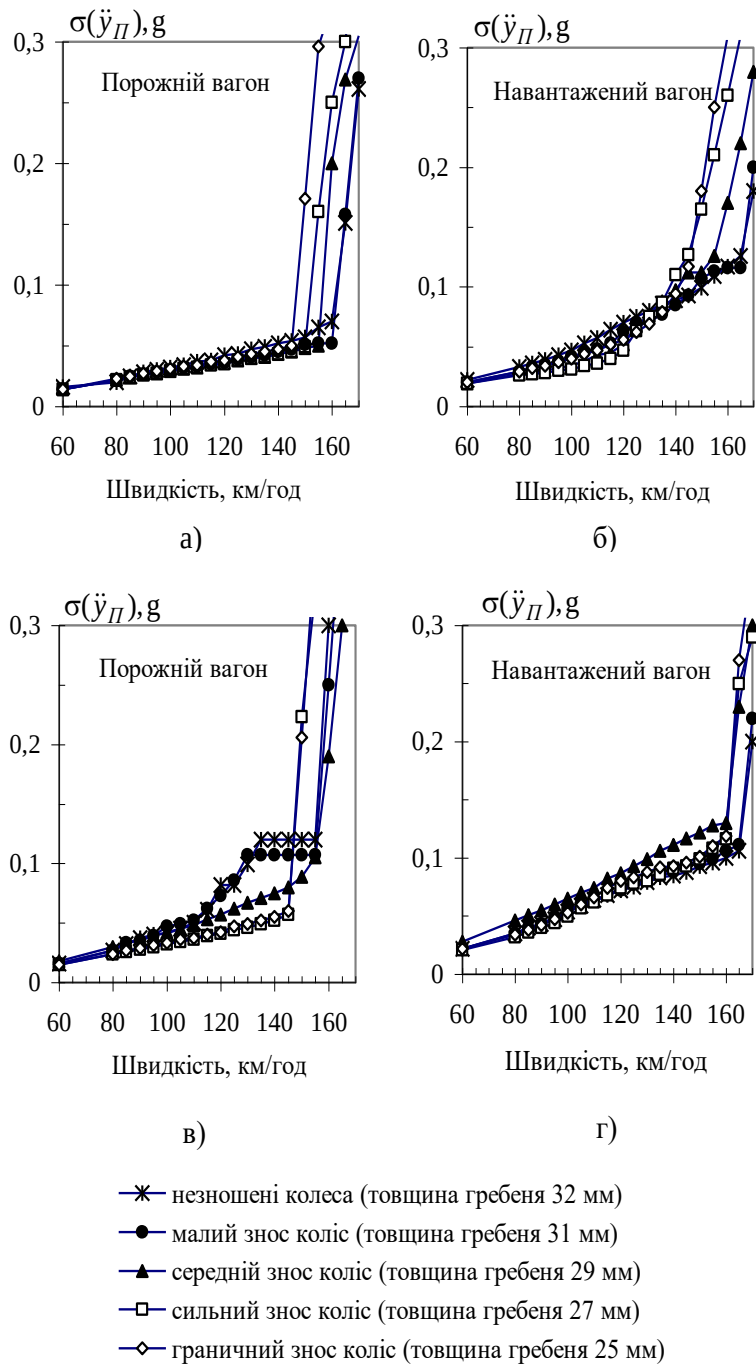


Рис. 1

кості руху по колії відповідно з незношеними (рис. 1 а), б)) та зношеними (рис. 1 в), г)) рейками.

З аналізу отриманих результатів витікає, що розглянутий екіпаж має високу стійкість руху. Так, на колії з незношеними рейками критична швидкість $V_{кр}$ порожнього вагона з незношеними та малозношеними колесами складає 165 км/год, при середньому зносі коліс – 160 км/год, при сильному зносі – 155 км/год і при граничному – 150 км/год. Для навантаженого вагона $V_{кр}$ становить відповідно 170 км/год, 160 км/год, 150 км/год та 150 км/год.

Аналогічний аналіз коливань піввагона на колії зі зношеними рейками показує, що у цьому випадку стійкість його руху ще менше залежить від зносу коліс: при незношених колесах і малому та середньому зносі коліс критична швидкість порожнього екіпажа дорівнює 160 км/год, а при сильному і граничному – 150 км/год. Для навантаженого вагона отримані такі значення $V_{кр}$: при незношених та малозношених колесах – 170 км/год, в інших випадках зносу коліс – 165 км/год.

Для пояснення такого явища проаналізовано геометричні параметри контакту коліс і рейок, оскільки вони чинять суттєвий вплив на рух залізничних екіпажів. На рис. 2 для прикладу показано портрети положення та розміри контактних плям, отриманих для випадків руху навантаженого піввагона по колії зі зношеними рейками при позитивних переміщеннях коліс відносно рейок 5, 6 і 7 мм (рис. 2 а), б) і в) відповідно). Як видно, коли колеса незношені, зона контакту розташовується ближче до гребеня, де конічність ободу колеса висока.

Від цього показника залежить стійкість руху залізничних екіпажів: чим вища конічність, тим нижча критична швидкість вагона. Тому $V_{кр}$ екіпажа зі зношеними колесами виявилася вищою, ніж на колії з незношеними рейками.

Стійкість руху піввагона з візками 18-9817 порівняно з іншими екіпажами. В роботі [9] виконано дослідження впливу зміни форми профілів ободів коліс при їх зносі на стійкість руху двох піввагонів зі стандартним осьовим навантаженням 23,5 тс: екіпажа з комплексно модернізованими візками моделі 18-100 (КМВ) і профілем коліс ІТМ-73 та вагона з серійними візками 18-100 і стандартними колесами. Для порівняння використані ці результати.

Отримані залежності критичної швидкості трьох екіпажів від товщини гребенів їх коліс при зносі наведено на рис. 3. Як видно, критична швидкість піввагона зі збільшеним осьовим навантаженням суттєво вища і у порожньому, і у навантаженому станах. При цьому знос коліс чинить найменший вплив на стійкість його руху. Так, якщо $V_{кр}$ порожніх вагонів із незношеними колесами при русі по колії з незношеними рейками дорівнює 165 км/год у вагона з візками 18-9817, 160 км/год у вагона з комплексно модернізованими візками і 140 км/год у вагона з серійними візками, то при сильно зношених колесах (товщина гребенів 27 мм) вона відповідно складає 155 км/год, 130 км/год і 80 км/год. Для навантажених вагонів в цих же умовах отримані такі значення критичної швидкості: при незношених колесах 170 км/год, 165 км/год і 140 км/год, а у випадку сильно зношених коліс – відповідно 150 км/год, 130 км/год і 80 км/год.

Таким чином, вантажний вагон нового покоління з підвищеним осьовим навантаженням має високу стійкість руху, яка мало залежить від зносу коліс і рейок.

Вплив зміни форми профілів коліс і рейок на динамічні якості даного екіпажа аналізувався при розрахунках його руху з постійною швидкістю від 60 км/год до 150 км/год по прямих ділянках колії. Задавалися випадкові вхідні збурення, що відповідають колії доброго стану. Модель збурень відображує амплітудно-частотний склад реальних нерівностей колії і побудована на основі записів показань колісвимірювального вагона, отриманих на ділянках колії доброго стану [10].

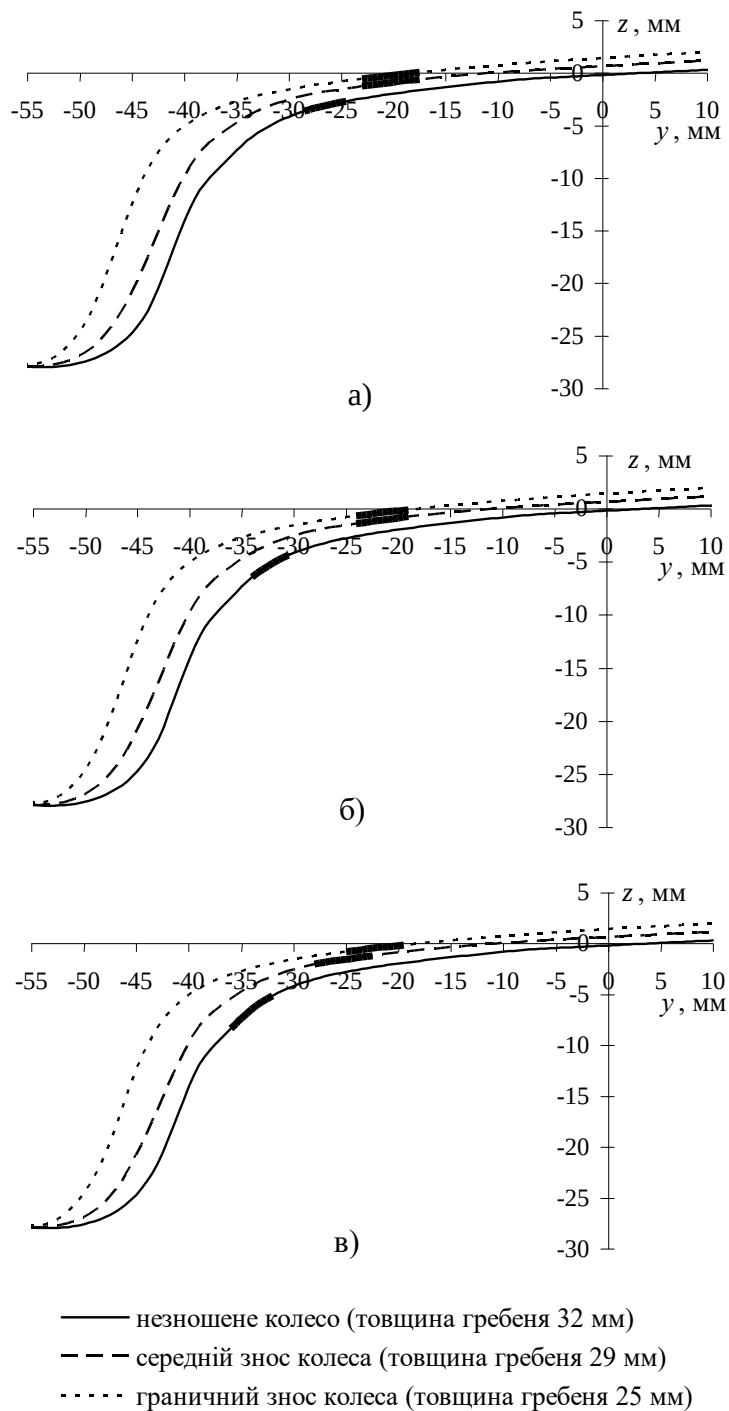
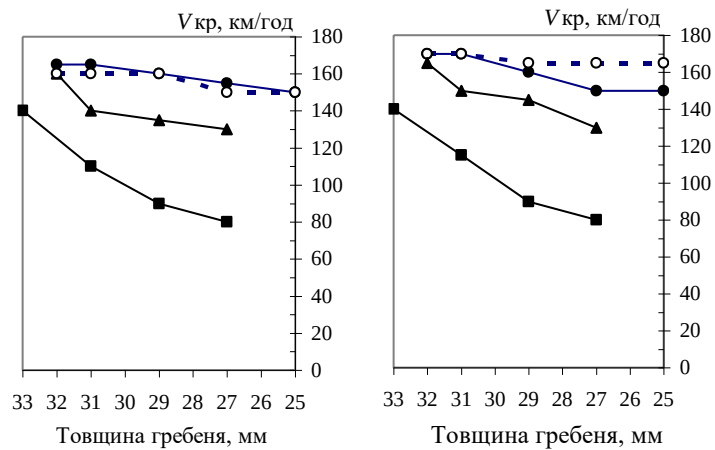


Рис. 2



а)

б)

- піввагон з візками 18-9817, рейки незношені
- піввагон з візками 18-9817, рейки зношені
- ▲— піввагон з КМВ, рейки незношені
- серійний піввагон с візками 18-100, рейки незношені

Рис. 3

Оцінювалися нормовані показники динамічних якостей піввагона в вертикальній і горизонтальній площинах, такі як прискорення, коефіцієнти динаміки та рамні сили. Динамічні якості у вертикальній площині як порожнього, так і навантаженого екіпажів не залежать від розглянутого зносу коліс та рейок. Вертикальні показники порожнього вагона не перевищують своїх гранично допустимих значень до швидкості руху 130 км/год та граничних значень для доброго ходу – до швидкості 115 км/год включно. Ці показники навантаженого екіпажа суттєво нижчі граничних значень для доброго ходу в усьому розглянутому діапазоні швидкостей.

На рис. 4 показані залежності максимальних горизонтальних поперечних прискорень п'ятників кузова $\ddot{y}_{\Pi}$ в долях прискорення вільного падіння g від швидкості руху V по колії відповідно з незношеними (рис. 4 а), б)) та зношеними (рис. 4 в), г)) рейками.

Як бачимо, в горизонтальній площині при невисоких значеннях V (до (105 – 110) км/год) показники порожнього вагона майже не залежать від зносу коліс та рейок і практично не перевищують граничне значення для доброго ходу. При подальшому зростанні V на колії з незношеними рейками вони починають перевищувати свої гранично допустимі значення при 135 км/год (у випадку незношених коліс) і 130 км/год (при всіх розглянутих зношених колесах).

Більш помітним вплив зносу коліс стає при русі порожнього вагона по зношених рейках: якщо колеса екіпажа незношені, то горизонтальні динамічні показники перевищують свої гранично допустимі значення при швидкості 140 км/год і в залежності від зносу коліс стають вище своїх гранично допустимих значень при досягненні V від 135 км/год (малий знос коліс) до 125 км/год (граничний знос коліс).

Ще менший вплив знос коліс та рейок чинить на динамічні якості навантаженого вагона. Так, навіть при середньому зносі коліс розглянуті показники нижче гранично допустимих значень в усьому розрахунковому діапазоні швидкостей при русі вагона по колії як з незношеними, так і зі зношеними рейками, і перевищують цей рівень при швидкості (140 – 150) км/год, якщо колеса сильно або гранично зношені.

Залежності від товщини гребенів коліс при зносі максимальної швидкості

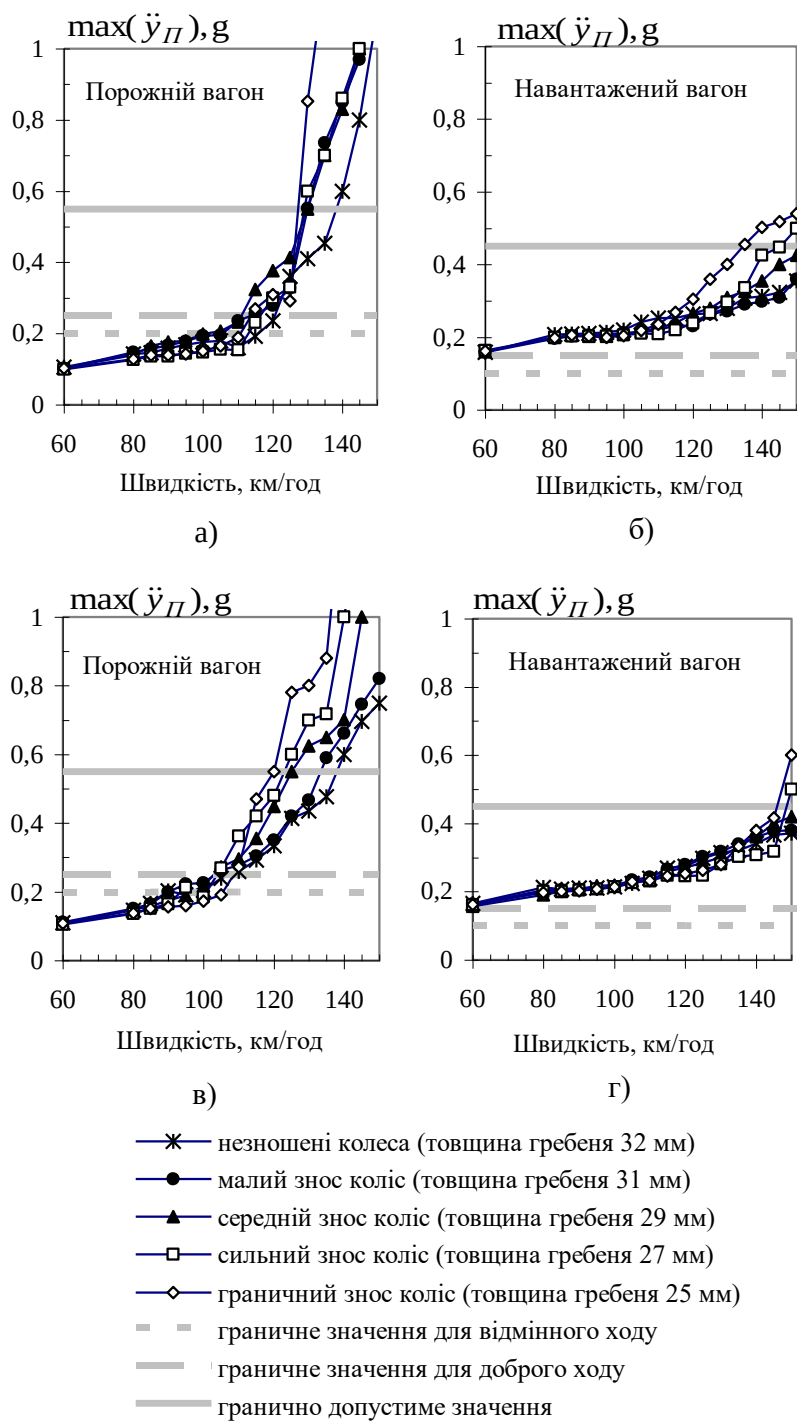


Рис. 4

ті руху $V_{\text{гран}}$, при якій нормовані показники динамічних якостей у вертикальній та горизонтальній площинах ще не перевищують гранично допустимі значення, показані на рис. 5. Тут для порівняння разом із даними для піввагона з візками 18-9817 наведені результати, отримані в роботі [11] при виконанні досліджень впливу зміни форми профілів ободів коліс при зносі на ди-

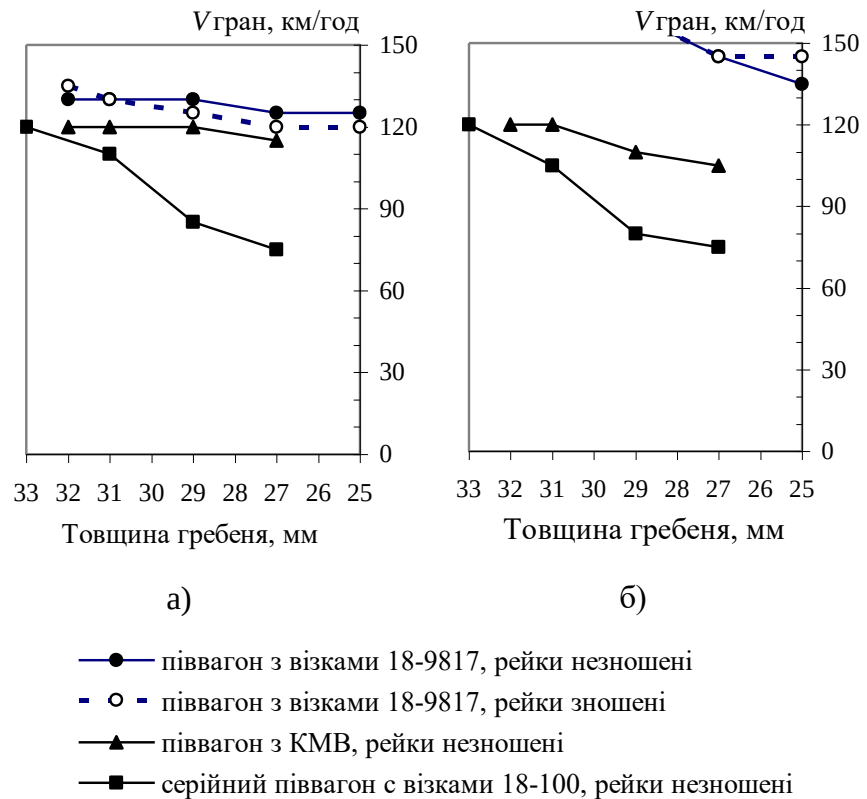


Рис. 5

намічні якості піввагонів зі стандартним осьовим навантаженням 23,5 тс: екіпажа з комплексно модернізованими візками моделі 18-100 і профілем коліс ІТМ-73 та вагона з типовими візками 18-100 і стандартними колесами. Як видно, значення $V_{\text{гран}}$ вагона з підвищеним осьовим навантаженням вищі, ніж у двох розглянутих екіпажів зі стандартним навантаженням, з особливо великою різницею при навантаженому стані вагонів.

Висновок: зміна профілів ободу коліс та головок рейок при їх зносі мало впливає на характеристики руху вантажного вагона нового покоління з перспективними візками 18-9817 з підвищеним осьовим навантаженням і розробленим зносостійким профілем коліс ІТМ-73-03. Стійкість руху і динамічні якості екіпажа залишаються на високому рівні. Застосування вказаного вантажного вагона на залізницях України цілком відповідає задачам оновлення вітчизняного рухомого складу: підвищення динамічних якостей екіпажів, збільшення ресурса ходових частин, зниження зносу елементів рухомого складу та колії.

1. 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.

2. Морозов В. Н. Комплексные подходы к развитию тяжеловесного движения в России. Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». 2014. № 2. С. 1–5.
3. Орлова А. Для повышения осевой нагрузки потребуется усилить инфраструктуру. Гудок. 2017. № 119. С. 5.
4. Бороненко Ю. П. Вагоны с увеличенными нагрузками от колес на рельсы – резерв повышения провозной и пропускной способности железных дорог. Транспорт Российской Федерации. 2008. № 5 (18). С. 52–55.
5. Бороненко Ю., Третьяков А., Зимакова М. Оценка возможности и эффективности повышения осевых нагрузок грузовых вагонов. Техника железных дорог. 2017. С. 1–3.
6. Тележка двухосная 18-9817 с нагрузкой от колесной пары на рельс 25 тс. [Электронный ресурс]. – URL http://okb.at.ua/publ/telezhka_dvukhosnaja_modeli_18_9817_s_nagruzkoj_ot_kolesnoj_pary_na_relsy_25t/1-1-0-6.
7. Ушкалов В. Ф., Мокрый Т. Ф., Малышева И. Ю., Безрукавый Н. В. Износостойкий профиль колеса для грузового вагона с повышенной осевой нагрузкой. Техническая механика. 2018. № 1. С. 20–29. <https://doi.org/10.15407/itm2018.01.020>
8. Ушкалов В. Ф., Мокрый Т. Ф., Малышева И. Ю., Безрукавый Н. В. Прогнозирование изменения профиля колес железнодорожного экипажа вследствие износа в процессе эксплуатации. Техническая механика. 2015. № 4. С. 148–154.
9. Ушкалов В. Ф., Мокрый Т. Ф., Малышева И. Ю., Безрукавый Н. В. Влияние изменения формы профилей колес в процессе эксплуатации на устойчивость движения грузовых вагонов. Техническая механика. 2016. № 4. С. 79–84.
10. Ушкалов В. Ф., Мокрый Т. Ф., Малышева И. Ю., Мащенко И. А., Лапина Л. Г., Пасичник С. С., Подъяельников И. В., Безрукавый Н. В. Обновление парка грузовых железнодорожных вагонов с повышением эксплуатационных качеств и увеличением ресурса ходовых частей. Техническая механика. 2013. № 4. С. 136–145.
11. Ушкалов В. Ф., Мокрый Т. Ф., Малышева И. Ю., Безрукавый Н. В. Влияние изменения формы профилей колес в процессе эксплуатации на динамические качества грузовых вагонов и показатели их взаимодействия с рельсовым путем. Техническая механика. 2017. № 1. С. 65–71. <https://doi.org/10.15407/itm2017.01.065>

Отримано 16.11.2020,
в остаточному варіанті 30.11.2020