УДК 629.7 https://doi.org/10.15407/itm2022.04.111

Т. Ф. МОКРІЙ, І. Ю. МАЛИШЕВА, Л. Г. ЛАПІНА, Н. В. БЕЗРУКАВИЙ

ПРОФІЛЬ ОБОДУ КОЛІС ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА ДЛЯ УМОВ СПІЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА УКРАЇНСЬКИХ І ЄВРОПЕЙСЬКИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ

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

Актуальність роботи пов'язана з розв'язанням важливої задачі сучасного розвитку залізничного транспорту України, прискоренням інтеграції України в європейські залізничні перевезення. Зараз найефективнішим способом подолання кордонів між країнами з різною шириною колії є застосування розсувних колісних пар, системи, яка здатна без зупинки руху залізничного складу змінюватися під ширину колії на спеціальних перекладних колійних пристроях. Застосування розсувних колісних пар для спільної експлуатації вагонів на українських і європейських залізницях пов'язано з вирішенням проблеми забезпечення доброї сумісності пари «колесо–рейка» на обох коліях.

Мета роботи полягала в розробці єдиного профілю обода коліс для експлуатації на вітчизняних і європейських залізницях, прогнозуванні безпеки руху вагонів з такими колесами, показників динамічних якостей і процесів їх динамічної взаємодії з коліями, що мають різні параметри.

Використано методи механіки деформівного твердого тіла, статистичної динаміки, чисельного інтегрування.

Побудовано сімейство профілів обода коліс і оцінено ефективність їх використання в колісних парах пасажирського вагона, що рухається по українських (ширина колії 1520 мм) та європейських (ширина колії 1435 мм) залізницях. Для кожного варіанта профілю розв'язувалась просторова задача контакту коліс і рейок, аналізувались параметри взаємодії, у тому числі розміри і розташування контактних плям. Також проводились розрахунки вписування вагона у кругову криву малого радіуса (R = 300 м) та його руху з різними швидкостями по прямих ділянках колії. Вибір серед побудованих профілів проводився за двома критеріями: гребеневого зносу коліс і стійкості руху екіпажа.

На підставі виконаних досліджень запропоновано новий зносостійкий профіль ободу залізничного колеса ІТМ-73ЕР, використання якого в розсувних колісних парах пасажирських вагонів дозволить при збереженні високих динамічних якостей екіпажів забезпечити прийнятні показники їхньої взаємодії з колією в умовах спільної експлуатації на українських і європейських залізницях.

Ключові слова: *швидкісні рейкові засоби, профілі ободів коліс, динамічні показники, процеси взаємодії, знос коліс і рейок.*

The relevance of this work stems from the urgent need for the modern development of the Ukrainian railway transport and the acceleration of Ukraine's integration into the European railway transportation. Currently, the most effective way to travel across borders between countries with different track gauges is the use of gauge-changeable wheelsets, a system that can change from one gauge to another when moving through special gauge changing facilities. The use of cars with gauge-changeable wheelsets on the Ukrainian and European railways calls for assuring a good compatibility of the wheel-rail pair on tracks of both gauges.

The goal of this work was to develop a unified wheel profile for the operation on the domestic and European railways and predict the safety of cars with that wheel profile, the ride quality, and processes of wheel-rail dynamic interaction for tracks with different parameters.

Use was made of methods of deformable solid mechanics, statistical dynamics, and numerical integration.

A family of wheel profiles was constructed, and the effectiveness of their use in passenger car wheelsets on the Ukrainian (1520 mm gauge) and European (1435 mm gauge) railways was evaluated. For each profile, the spatial problem of wheel–rail contact was solved, and the interaction parameters were analyzed, including the dimensions and location of the contact patches. Calculations were also made for a car negotiating a circular curve of a small radius (R = 300 m) and moving at different speeds on tangent track sections. The choice among the constructed profiles was made according to two criteria: wheel flange wear and car dynamic stability.

Based on the studies conducted, a new wear-resistant wheel profile, ITM-73EP, was proposed. Its use in gauge-changeable wheelsets of passenger cars will provide reasonable indices of wheel–rail interaction both on the Ukrainian and on the European railways without sacrificing car dynamic performance.

***Keywords*:** *fast gauge changing facilities, wheel profile, dynamic performance, interaction processes, wheel and rail wear.*

Експлуатаційна залізнична мережа України є однією з найбільших у Європі та сягає близько 21 тис. кілометрів. Наша країна відіграє роль транзитного транспортного мосту, який з'єднує країни Європи та Азії, оскільки через її територію проходить низка міжнародних транспортних коридорів: Пан'єв-

ропейські транспортні коридори № 3, 5, 7, 9; коридори Організації співробітництва залізниць № 3, 4, 5, 7, 8, 10; Трансєвропейська транспортна мережа (TEN-T), коридор Європа–Кавказ–Азія (ТРАСЕКА).

У 2018 році Кабінет Міністрів України затвердив національну транспортну стратегію країни на період до 2030 року, яка визначає пріоритети розвитку галузі [1]. Її метою є створення інтегрованого до загальносвітової транспортної мережі безпечно функціонуючого та ефективного транспортного комплексу України. Одне із завдань стратегії – забезпечення експлуатаційної сумісності національної транспортної системи з мультимодальною світовою транспортною мережею, у тому числі залізничною мережею колії завширшки 1435 мм; участь України у масштабних міжнародних транспортних проєктах.

Передбачається збільшення перевезень контейнерів та інших вантажів через територію України, зокрема у рамках розвитку транспортних маршрутів: країни ЄС – Китай ("Новий Шовковий шлях"), країни ЄС – Іран та Індія, країни ЄС – Туреччина та інші. У цьому випадку виникає проблема, спричинена різною шириною залізничної колії в Україні (1520 мм) та більшості європейських країн (1435 мм).

Технологія переходу вагонів з однієї ширини колії на іншу почала розроблятись ще на початку XX століття [2, 3]. На прикордонних станціях основними методами були пересадка пасажирів та перевантаження вантажів, що сильно збільшувало час перебування поїздів у дорозі та вимагало великих додаткових матеріальних витрат. Згодом були організовані спеціальні пункти перестановки візків вантажних та пасажирських вагонів для різної ширини колії, але це знизило час обороту вагонів та витрати технологічних та виробничих ресурсів несуттєво.

Сьогодні найбільш ефективним способом подолання залізничним рухомим складом системних стиків колії є застосування розсувних колісних пар, здатних без зупинки руху змінювати відстань між колесами під іншу ширину колії на спеціальних перехідних колійних пристроях, що дозволяє поїздам долати пункти зміни ширини колії без заміни вагонних візків.

При цьому повинні забезпечуватися не тільки велика надійність самої колісної пари, оскільки її відмова може призвести до аварій з тяжкими наслідками, а й висока якість взаємодії коліс та рейок, від якої також суттєво залежить безпека руху. У разі практичного застосування ходових частин з розсувними колісними парами на українських та європейських залізницях для забезпечення доброї сумісності пари "колесо–рейка" потрібне вирішення ще однієї проблеми – розробка єдиного профілю ободів коліс з урахуванням профілів головок рейок Р65 (Україна) і UIC (Європа) та їх підхилу 1/20 і 1/40 відповідно [4].

В даній роботі представлено результати вирішення зазначеної задачі стосовно вітчизняного стандартного пасажирського вагона, який рухається з постійною швидкістю по коліях з різними параметрами. При цьому особливу увагу приділено дослідженням безпеки руху вагона, показників динамічних якостей та процесів його взаємодії з колією.

Використовувалася просторова математична модель взаємодії залізничного екіпажа та інерційної пружнодисипативної колії, в якій враховуються розміри плям контакту та розподіл по них нормальних та дотичних сил взаємодії [5]. Задача контакту вирішується у припущенні про безвідривний рух

колеса по рейці. Вхідними параметрами є кути бічної хитавиці та виляння колісної пари, взаємне поперечне зміщення колеса та рейки.

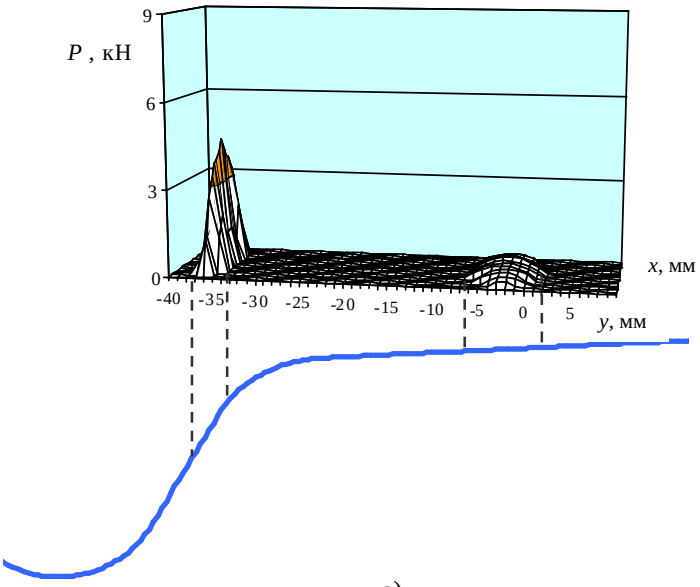
Розподіл сил взаємодії по поверхні знайденої контактної плями визначається шляхом поділу її на малі скінченні елементи, у кожному з яких контакт вважається одноточковим і обчислюються елементарні сили. Дотичні елементарні сили вважаються силами крипу. Повна поздовжня та поперечна складові розподіленої сили крипа дорівнюють сумі відповідних елементарних сил. Елементарні вертикальні сили взаємодії обчислюються шляхом розподілу повної вертикальної сили між елементами контактної плями пропорційно величині заглиблення колеса в рейку в кожному елементі.

Для отримання оцінок показників динамічних якостей вагона сформовано процеси збурень, що діють з боку колії. Під збуренням розуміється сукупність чотирьох складових, що характеризують вплив колії на екіпаж у вертикальній та горизонтальній площинах та викликають його просторові коливання.

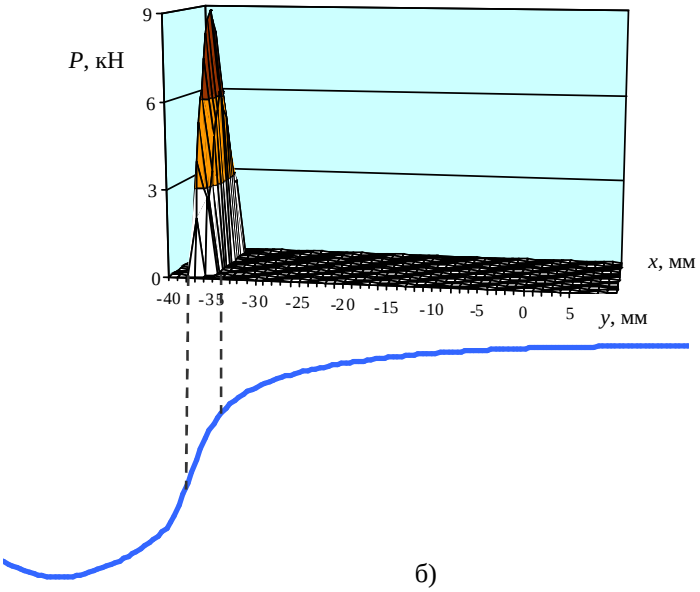
Оскільки головним чинником виникнення коливань у динамічній системі «екіпаж–колія» є нерівності колії, одним із поширених підходів до формування збурень є використання фактичних нерівностей рейкових ниток реальних ділянок залізниць. Вибір таких ділянок проводився за критерієм відповідності геометричних параметрів колії вимогам стандарту ДСТУ EN 13848-5:2018 [6] (європейського стандарту, прийнятого в Україні в якості національного методом підтвердження). В результаті відібрано низку ділянок українських залізниць, якісний стан яких оцінюється як відмінний, а рівень нерівностей відповідно до нормативної частини стандарту [6] дозволяє рух зі швидкостями до 230 км/год, а в окремих випадках і вище. Для кожної з цих ділянок сформовано відповідні вертикальні та горизонтальні складові збурень.

Нижче наведено результати розв’язання контактної задачі, отримані для завантаженого пасажирського вагона. Задавались колеса зі стандартним профілем ободів за ГОСТ 9036-88 (Україна) та S1002 (Європа), рейки – Р65 з підхилом 1/20 (Україна) та UIC60 з підхилом 1/40 (Європа). На рис. 1 показано розподіл по плямах контакту вертикального тиску *P* на колесі, що набігає, при вписуванні даного екіпажа в кругову криву радіуса 300 м з вітчизняними рейками Р65, на рис. 2 – з європейськими рейками UIC60.

Як свідчать отримані результати, дані показники значно кращі у випадку застосування своїх коліс і рейок як на українських, так і європейських залізницях. Так, у фазі гребеневого контакту з рейкою Р65 взаємодія вітчизняного стандартного колеса є двоточковою з розташуванням однієї з плям у зоні кола катання (рис. 1, а)), а колеса з профілем S1002 – одноточковою на гребені (рис. 1, б)). При цьому тиск на гребені європейського колеса вдвічі вищий ніж українського. Взаємодія даних коліс з рейкою UIC60 (див. рис. 2) іншого характеру: стандартне українське колесо має контактну пляму на гребені при високому тиску (рис. 2, а)), тоді як європейське колесо з профілем S1002 проходить фазу конформного контакту з розташуванням великої плями на галтелі та поверхні катання (рис. 2, б)).



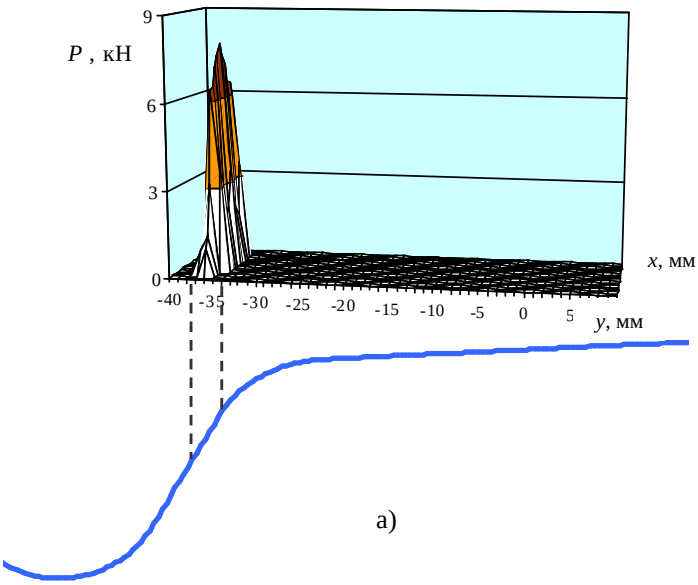
а)



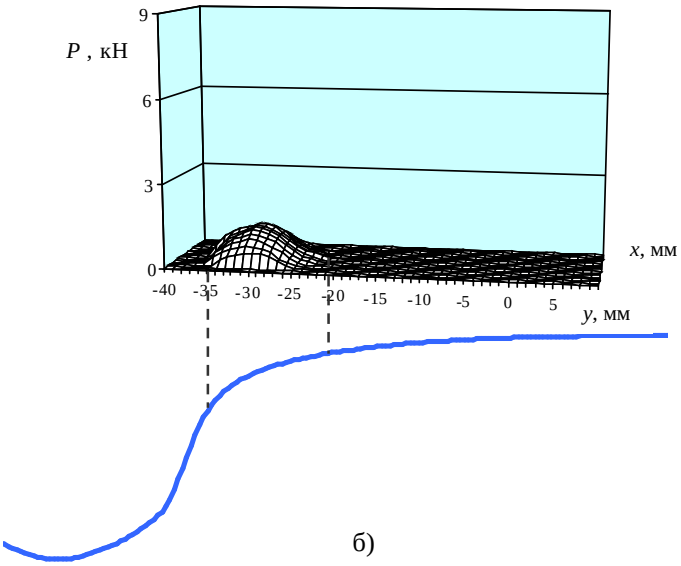
б)

а) – профіль колеса стандартний (Україна);
б) – профіль колеса S1002 (Європа)

Рис. 1



а)



б)

а) – профіль колеса стандартний (Україна);
б) – профіль колеса S1002 (Європа)

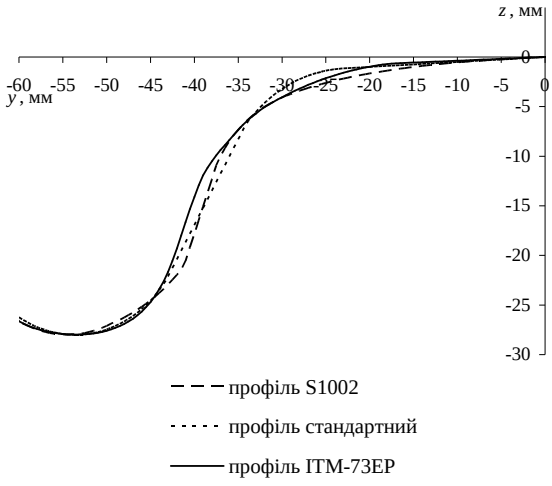
Рис. 2

Тому для підвищення експлуатаційної сумісності цих національних транспортних мереж доцільною є розробка нового профілю коліс, який би забезпечував досить добрі умови взаємодії екіпажів з рейками як на українських, так і на європейських залізницях.

Далі наведено результати розробки профілю колеса для пасажирського вагона, який рухається по коліях з двома типами рейок: UIC60 з підхилом 1/40 та Р65 з підхилом 1/20.

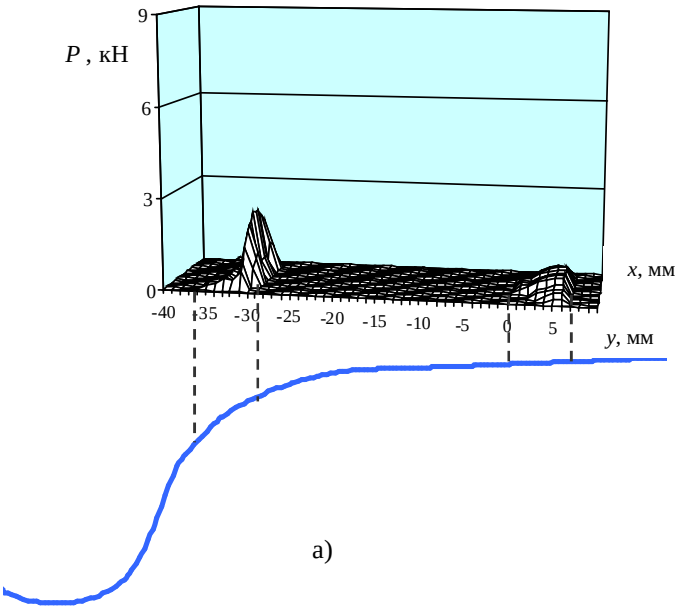
Побудовано сімейство профілів коліс із товщиною гребеня 32 мм. При їх розробці ставилося завдання отримання добрих показників взаємодії вагона та колії як на українських, так і на європейських залізницях, за умов збереження високих динамічних якостей та плавності ходу екіпажа. Для кожного варіанта профілю вирішувалася просторова задача контакту коліс та рейок, аналізувалися параметри взаємодії, у тому числі розміри та положення контактних плям. Також проводилися розрахунки вписування вагона з такими колесами в кругову криву малого радіуса (R = 300 м) та його руху по прямих ділянках колії. При аналізі отриманих результатів серед побудованих профілів проводився вибір за двома критеріями: гребеневого зносу коліс та стійкості руху екіпажа. Вибраний варіант профілю отримав назву ІТМ-73ЕР.

На рис. 3 показано порівняння розробленого профілю коліс із українським стандартним та європейським S1002, а на рис. 4 – розподіл вертикального тиску Р по плямах контакту на набіжному колесі з профілем ІТМ-73ЕР завантаженого пасажирського вагона при його вписуванні в кругову криву радіуса 300 м. Видно, що взаємодія колеса з новим профілем та обох рейок проходить фазу двоточкового контакту при невисокому тиску, друга контактна пляма розташована не на гребені, а на галтелі, що в експлуатації сприятиме зниженню гребеневого зносу.

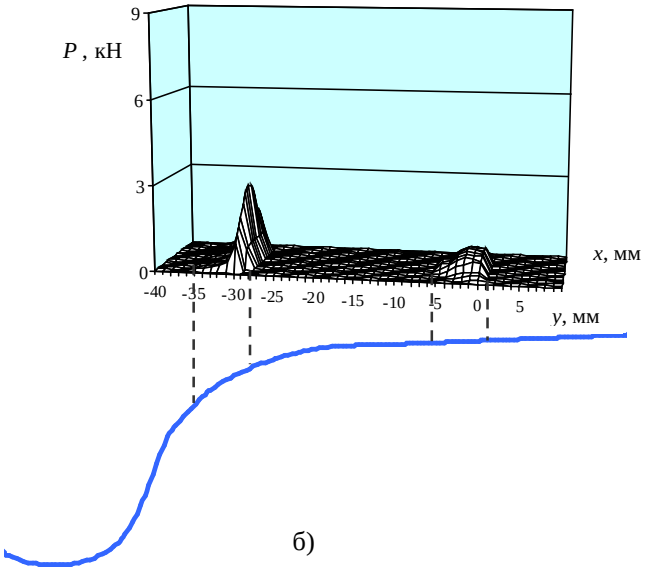


z, y - лінійні розміри

Рис. 3



а)



б)

а) – рейка Р65; б) – рейка UIC60

Рис. 4

Одним із найважливіших показників динамічних якостей залізничних екіпажів є стійкість руху. Положення плям контакту на поверхні катання колеса з профілем ІТМ-73ЕР в зонах з малим кутом нахилу до горизонту дозволяє прогнозувати високу стійкість руху екіпажа.

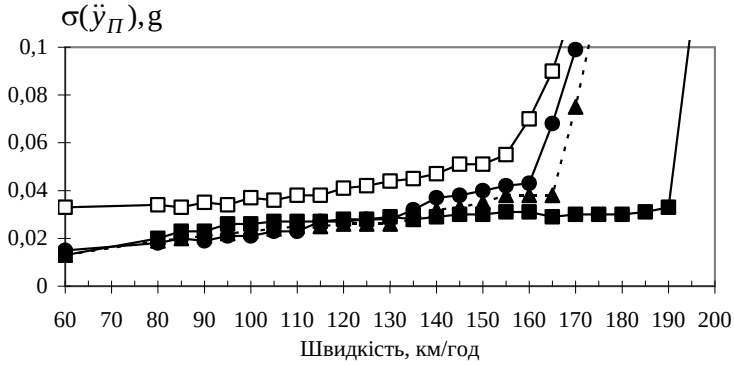
Вплив використання профілю коліс ІТМ-73ЕР на стійкість руху завантаженого пасажирського вагона вивчався за результатами розрахунків його руху з постійною швидкістю по прямих ділянках колії. На рис. 5 показано залежність середньоквадратичних відхилень (СКВ) поперечних прискорень п'ятників кузова $\ddot{y}_{\text{П}}$ в частках прискорення вільного падіння g від швидкості руху вагона по коліях із двома типами рейок: UIC60 з підхилом 1/40 (рис. 5, а)) та Р65 з підхилом 1/20 (рис. 5, б)). Відомо, що вітчизняним колесам зі стандартним профілем властиве швидке зношування поверхні катання, що значно знижує стійкість руху екіпажів, тому для порівняння на рис. 5 також наведено результати, отримані для випадку, коли стандартні колеса зношені до товщини гребеня (ТГ) 30 мм – найменшої допустимої для пасажирських вагонів при швидкостях руху вище 160 км/год [7]. Як видно, екіпаж з такими колесами має найнижчу критичну швидкість (швидкість, при якій починається різке зростання СКВ) із низки розглянутих випадків.

Критична швидкість руху пасажирського вагона з розробленим профілем коліс ІТМ-73ЕР суттєво вища: 170 км/год під час руху європейською та 180 км/год – українською колією (див. табл. 1).

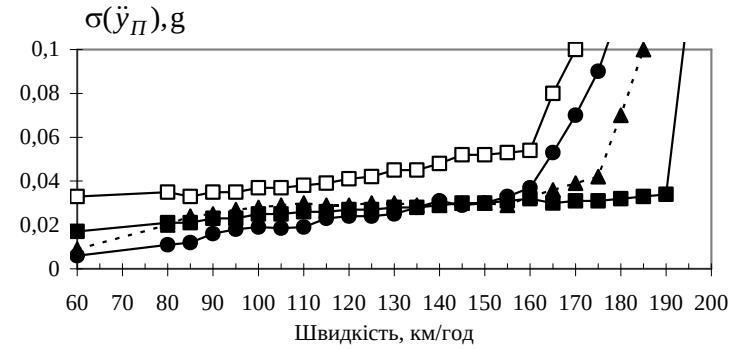
Табл. 1 – Критична швидкість руху, км/год, пасажирського вагона з різними профілями ободів коліс

Рейки	Колеса			
	Незношені з профілем S1002	Незношені зі стандартним профілем	Зношені зі стандартним профілем (ТГ=30 мм)	Незношені з профілем ІТМ-73ЕР
UIC60	165	195	160	170
Р65	165	185	165	180

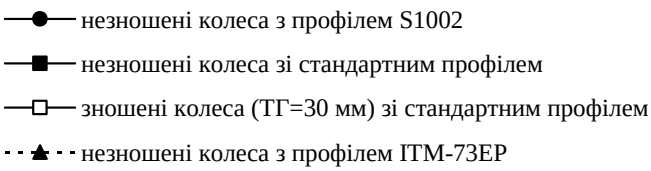
Вплив використання розробленого профілю обода коліс на динамічні якості пасажирського вагона аналізувався при розрахунках руху екіпажа з постійною швидкістю від 60 км/год до 170 км/год по прямих ділянках колії. Найбільш вагомим показником з погляду комфортності перевезення пасажирів є плавність ходу вагона. У табл. 2 наведено максимальні значення швидкості, при русі з якою плавність ходу у вертикальному (*Wz*) і горизонтальному (*Wy*) напрямках у місцях бічних сидінь у п'ятникових перетинах кузова (найбільш чутливі перетини) залишається задовільною (не вище 3,25).



а)



б)



а) – рейки UIC60; б) – рейки Р65

Рис. 5

Табл. 2 – Максимальна швидкість, км/год, при русі з якою плавність руху пасажирського вагона у місцях бічних сидінь у п'ятникових перетинах кузова залишається задовільною

Рейки	Плавність ходу	Колеса			
		Незношені з профілем S1002	Незношені зі стандартним профілем	Зношені зі стандартним профілем (ТГ=30 мм)	Незношені з профілем ІТМ-73ЕР
UIC60	*Wz*	170	170	170	170
	Wy	150	160	140	160
Р65	*Wz*	170	170	170	170
	Wy	160	160	140	160

Як видно, при русі і європейською, і вітчизняною залізницею пасажирський вагон, обладнаний колесами з розробленим профілем обода ІТМ-73ЕР, має високі динамічні якості.

Висновок: Розроблено новий зносостійкий профіль обода залізничного колеса ІТМ-73ЕР, використання якого у пасажирських вагонах дозволить при збереженні високих динамічних якостей екіпажів забезпечувати прийнятні показники їхньої взаємодії з колією в умовах спільної експлуатації на українських та європейських залізницях.

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Постанова Кабінету Міністрів від 30 травня 2018 р. № 430-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80.
2. Раздвижные колесные пары для вагонов. URL: http://1430mm.ru/node/264 (дата звернення 15.05.2021).
3. Колесная пара с раздвижными на оси колесами. URL: https://pikabu.ru/story/razdvizhnyie_kolyosnyie_paryi_6989147 (дата звернення 06.01.2020).
4. *Курган Н., Возная Е.* Повышение интероперабельности в международном железнодорожном сообщении Австрия – Словакия – Украина – Россия. Українські залізниці. 2014. № 12 (18). С. 24–33.
5. *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.
6. ДСТУ EN 13848-5:2018 (EN 13848-5:2017, IDT). Залізничний транспорт. Колія. Властивості геометрії колії. Частина 5. Геометричні порівняльні властивості. Проста лінія. 2018.
7. Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар: ЦВ-ЦЛ-0062. – Затв. «Укрзалізниця» 01.04.05 р. вид. офіц. К.: ТОВ «НВП Поліграфсервіс». 2006. 102 с.

Отримано 07.11.2022,
в остаточному варіанті 21.11.2022