

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.62.027.4:625.143.3.033.373

О. В. ШАТУНОВ^{1*}, А. О. ШВЕЦЬ^{2*}, О. А. КИРИЛЬЧУК^{3*}, А. О. ШВЕЦЬ^{4*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 953 60 14, ел. пошта shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

^{2*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, ел. пошта angela.shvets69@gmail.com, ORCID 0000-0002-8469-3902

^{3*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 27, ел. пошта o.a.kirilchuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0565-1692

^{4*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 235 19 67, ел. пошта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-0717-2521

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ КОЛІС ТА РЕЙОК ЗА НЕСИМЕТРИЧНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ПЛАТФОРМИ

Мета. У науковій роботі потрібно провести визначення впливу несиметричного завантаження вагона-платформи на величину фактора зносу пари «колесо–рейка» в разі зміни параметрів, що мають місце в експлуатації. **Методика.** Динамічну навантаженість вагона-платформи моделі 13–401 з типовими трьохелементними візками досліджено з використанням моделі просторових коливань зчепу з п'яти вагонів за допомогою математичного й комп'ютерного моделювання. Теоретичні розрахунки виконано для найбільш небезпечних ділянок залізничної колії – кривих малого й середнього радіуса в інтервалі допустимих швидкостей руху. **Результати.** Проаналізовано показники зносу коліс рухомого складу й рейок на прикладі вагонів-платформ за наявності поздовжнього й поперечного зміщення центра мас вантажу відносно центра симетрії вагона. Для отримання інформації про вплив допустимих відхилень розташування вантажу у вагоні на величину динамічної навантаженості контакту «колесо–рейка» виконано теоретичні дослідження просторових коливань рейкового екіпажу та його взаємодії з колією. **Наукова новизна.** Для визначення зносу пари «колесо–рейка» досліджено вплив зміщення у двох напрямках від центральної осі симетрії центра мас вантажу з огляду на величину швидкості руху по кривих ділянках колії малого й середнього радіуса із застосуванням математичної моделі зчепу з п'яти вантажних вагонів. **Практична значимість.** У результаті проведених теоретичних досліджень оцінено такі показники, як фактор зносу, напрямлена сила й виляння колісної пари вантажного рухомого складу в разі зміщення центра мас вантажу під час руху по криволінійних ділянках залізничної колії. Для встановлення ймовірної причини інтенсивного зносу коліс і рейок проаналізовано параметри: забігання бокових рам переднього візка; виляння лівої бокової рами переднього візка; взаємне поздовжнє переміщення бокової рами й буксового вузла передньої колісної пари; взаємне виляння лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари.

Ключові слова: вантаж; вагон-платформа; забігання бокових рам візка; зміщення центра тяжіння вантажу; кут виляння колісної пари; швидкість руху; фактор зносу

Вступ

Інтенсивність зносу пари «колесо–рейка» й до тепер є однією з найсерйозніших проблем залізничного транспорту. Аналіз публікацій

і досліджень, пов'язаних із цим питанням, показав, що підвищений знос рейок і коліс рухомого складу може бути викликаний декількома причинами, пов'язаними як зі станом ходових

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

частин екіпажів, так і зі станом рейкової колії в кривих ділянках [5, 8, 9, 16].

Знос коліс та рейок залежить від фізико-механічних процесів, що протікають у ділянці їх контакту. Характер цих процесів та їх інтенсивність значною мірою залежать від зовнішніх впливів на поверхню місця контакту, зокрема, від сил взаємодії тіл, що контактують і їх відносних переміщень. Тому одним із можливих шляхів вирішення проблеми зниження інтенсивності зносу гребенів коліс і бокових поверхонь головок рейок є встановлення умов зниження зовнішніх впливів на тіла, що контактують, або зниження динамічної навантаженості місця контакту. Істотне значення мають також взаємні переміщення тіл, що контактують, оскільки знос пов'язаний із роботою тертя (сил псевдоскозання) по площі контакту. Тому розв'язання поставленої задачі зводиться до мінімізації сил взаємодії та взаємних переміщень пари «колесо–рейка» в місцях контакту.

Визначення показника зносу пов'язано із завданням дослідження просторових коливань і взаємодії рейкового екіпажу й колії. Для вирішення цього завдання в Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна розроблено математичні моделі, які дають можливість визначити необхідні величини сил і переміщень, а за вихідну величину отримати значення показника зносу [2–4, 12, 15]. За допомогою цих моделей

можна отримувати рішення для різних видів контакту колеса й рейки, враховувати жорсткості елементів конструкції й різні відступи від початкової конфігурації системи, такі, наприклад, як неспіввісність осей колісних пар у візку, різниця діаметрів коліс однієї колісної пари, різних колісних пар у візку та різних візках, профілі коліс і рейок різних типів, зміна поперечного зазору колісної пари й рейкової колії, зміна поздовжніх і поперечних зазорів між буксами й боковими рамами, зміщення центра мас кузова відносно центра симетрії вагона й т. ін. [5, 13, 17–19, 20–22].

Мета

Це дослідження має за мету визначити вплив несиметричного завантаження вагона-платформи на величину фактора зносу пари «колесо–рейка» в разі зміни параметрів, що мають місце в експлуатації.

Методика

Теоретичні дослідження динамічної навантаженості контакту «колесо–рейка» під час руху вагона-платформи моделі 13–401 з типовими візками 18–100 в інтервалі швидкостей $50 \div 90$ км/год в кривих малого й середнього радіуса виконано з використанням моделі просторових коливань зчепу з п'яти вагонів (рис. 1) [2–4, 6, 10, 21].

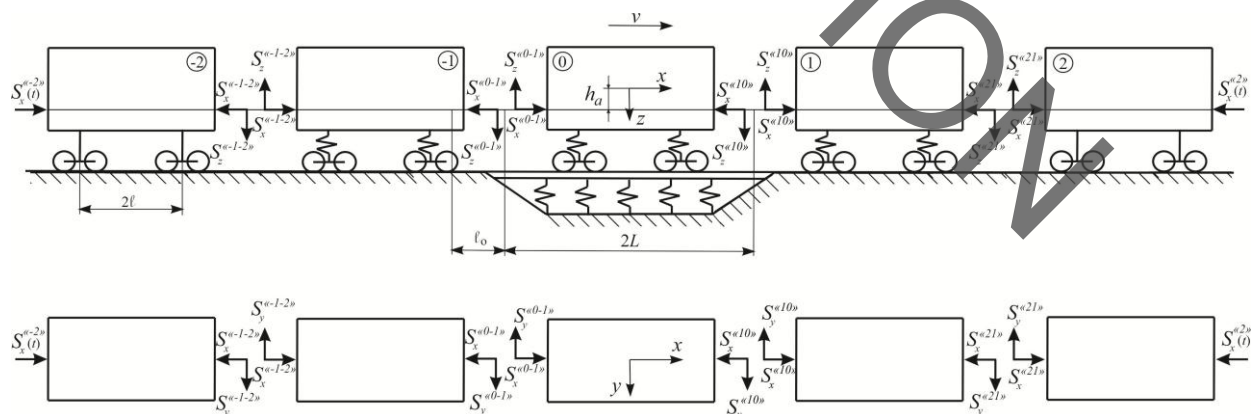


Рис. 1. Розрахункова схема зчепу з п'яти вантажних вагонів

Вагон-платформу розглянуто як механічну систему (рис. 2), яка складається з 12 твердих тіл (вантаж, рама платформи, дві надресорні

балки, чотири бокові рами візків, чотири колісні пари).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

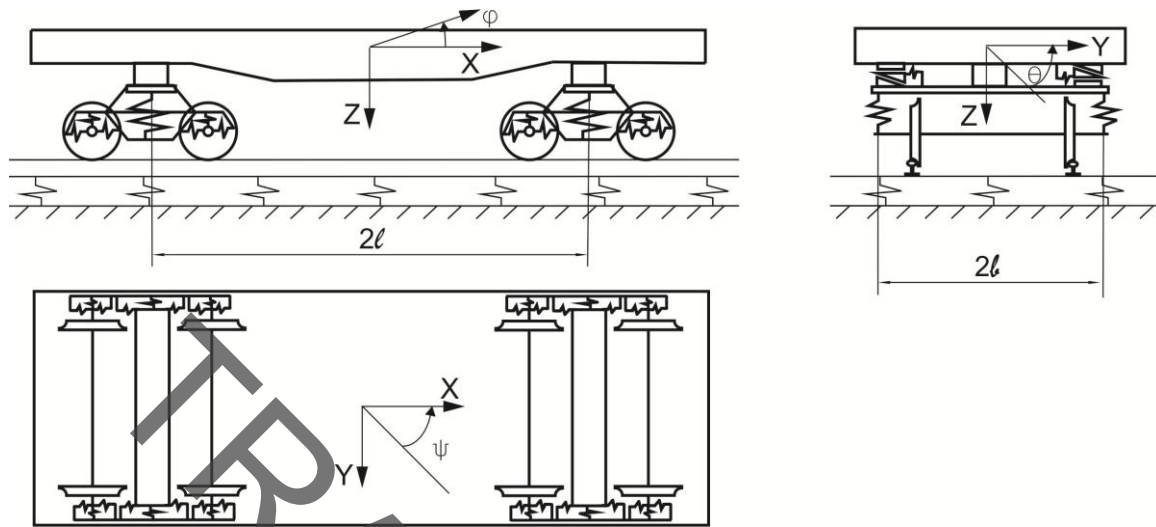


Рис. 2. Розрахункова схема 4-вісного вагона-платформи

У нашому дослідженні вивчено вплив зсуву центра мас вантажу на рамі вагона-платформи в поздовжньому A_x і поперечному напрямках A_y , а також в обох напрямках одночасно. Попередні теоретичні дослідження показали, що за наявності поперечного або спільного поперечного й поздовжнього зсуву центра мас вантажу понад $A_y = 0,15$ м відбувається різке зниження коефіцієнта запасу стійкості від сходження коліс із рейок та існує велика ймовірність сходження рухомого складу з рейок [21].

Із метою встановлення впливу тільки зсуву центра мас вантажу на фактор зносу коліс і рейок зміщення в поперечному та спільному поперечному й поздовжньому напрямках розглянуто в межах $A_y \rightarrow -0,15 \div 0,15$ м й $A_x \rightarrow 0; 0,15$ м. Досліджено стаціонарний рух зчепу з п'яти вантажних вагонів у правій кривій. Отже, ліве колесо першої колісної пари набігає на зовнішню рейку. Ходові частини вагона, поверхня кочення колеса й профіль головки рейки передбачені в нормальному технічному стані.

Результати

Графіки зміни досліджуваних показників під час руху в кривих ділянках колії $R = 600$ і 350 м наведено на рис. 3–8. Зсув у поздовжньому напрямку (рис. 3, 4) розглянуто в межах

від 0 до $A_x = 0,3$ м. Для детального аналізу фізичних процесів, що відбуваються під час ковзання гребеня колеса по боковій грані рейки, потрібно досліджувати відповідні залежності напрямленої сили й кута набігання колісної пари [5].

Як видно з рис. 3 (а, б), зі збільшенням поздовжнього зміщення центра мас вантажу фактор зносу майже не змінюється. Значний вплив на цей показник має швидкість руху. У кривих $R = 350$ м фактор зносу Φ із підвищенням швидкості руху з 50 до 70 км/год зменшується в 2,7 разів. Рівень фактора зносу в кривих малого радіуса більший за відповідні значення в кривих середнього радіуса в 16,8÷6,7 разів у діапазоні швидкостей 50÷70 км/год. Це може бути пояснено більшими рівнями напрямлених сил Y_N (рис. 3, в, г) і кутів виляння $\psi_{кп}$ (рис. 3, д, е) у кривих $R = 350$ м. За швидкості 90 км/год показник $\psi_{кп}$ у разі збільшення поздовжнього зсуву в кривій $R = 600$ м від 0 до 0,3 м значно відрізняється від інтервалу швидкостей 50÷80 км/год й перевищує відповідні значення в середньому на 29,5%. Крім того, кути виляння $\psi_{кп}$ в обох кривих мають знак «-», тобто колісні пари повертаються в площині колії проти напрямку кривої відповідно до прийнятого правила знаків (рис. 2).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

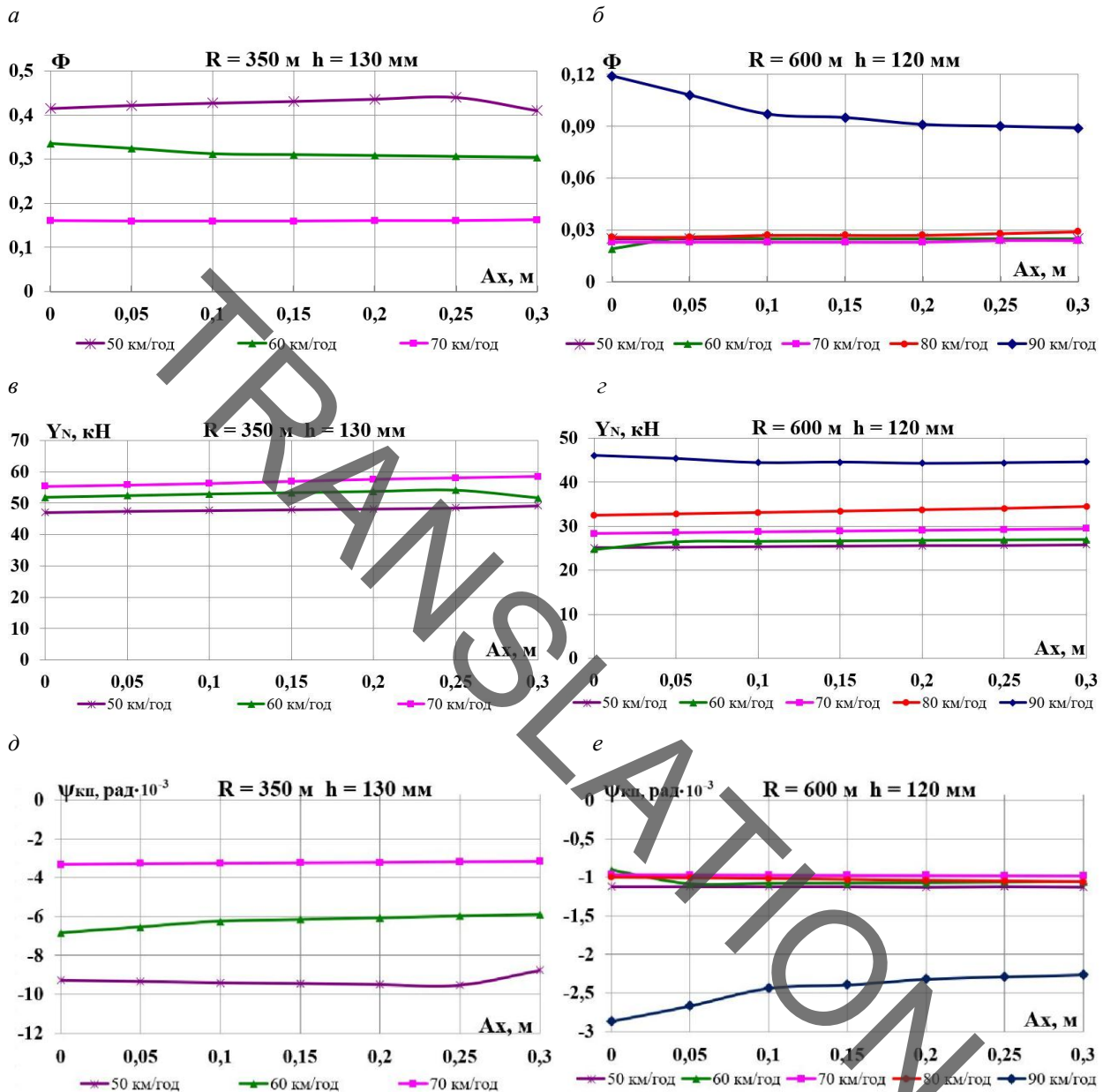


Рис. 3. Графіки залежності від зміщення вантажу в поздовжньому напрямку:

$a, б$ – фактора зносу; $в, г$ – напрямленої сили, що діє з боку колії на колесо; $д, е$ – вилання колісної пари

До недоліків трьохелементного візка моделі 18–100 належить можливість забігання бокових рам під дією поздовжніх складових сил тертя на контактах коліс із рейками, що викликає втрату геометрії рами візка й появу перекосів осей колісних пар у ній. Крім того, конструкція буксового отвору бокової рами й буксового вузла передбачає наявність поздовжнього й поперечного зазорів між приливами корпусу букси й

напрямних буксового отвору, через які також може змінюватися характер їх контакту. Саме це явище негативно впливає на динаміку вагона і, як наслідок, призводить до інтенсивного зносу гребенів колісних пар [1, 7, 9, 14, 23].

До того ж, поздовжні забігання бокових рам одна відносно одної особливо шкідливі під час руху по кривих ділянках колії, тому що викликають повороти колісних пар у площині колії

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

проти напрямку кривої. Це, у свою чергу, збільшує кути набігання гребенів коліс на рейки, від яких залежить їх взаємний знос, тому що при цьому зменшується площа контактної ділянки гребеня з боковою гранню рейки і, відповідно, збільшується на ній питомий тиск, що визначає їх знос.

Для встановлення ймовірної причини інтенсивного зносу коліс і рейок під час руху в кри-

вих $R = 600$ м розглянемо наступні параметри: забігання бокових рам переднього візка; виляння лівої бокової рами переднього візка; взаємне поздовжнє переміщення бокової рами й буксового вузла передньої колісної пари; взаємне виляння лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари (рис. 4).

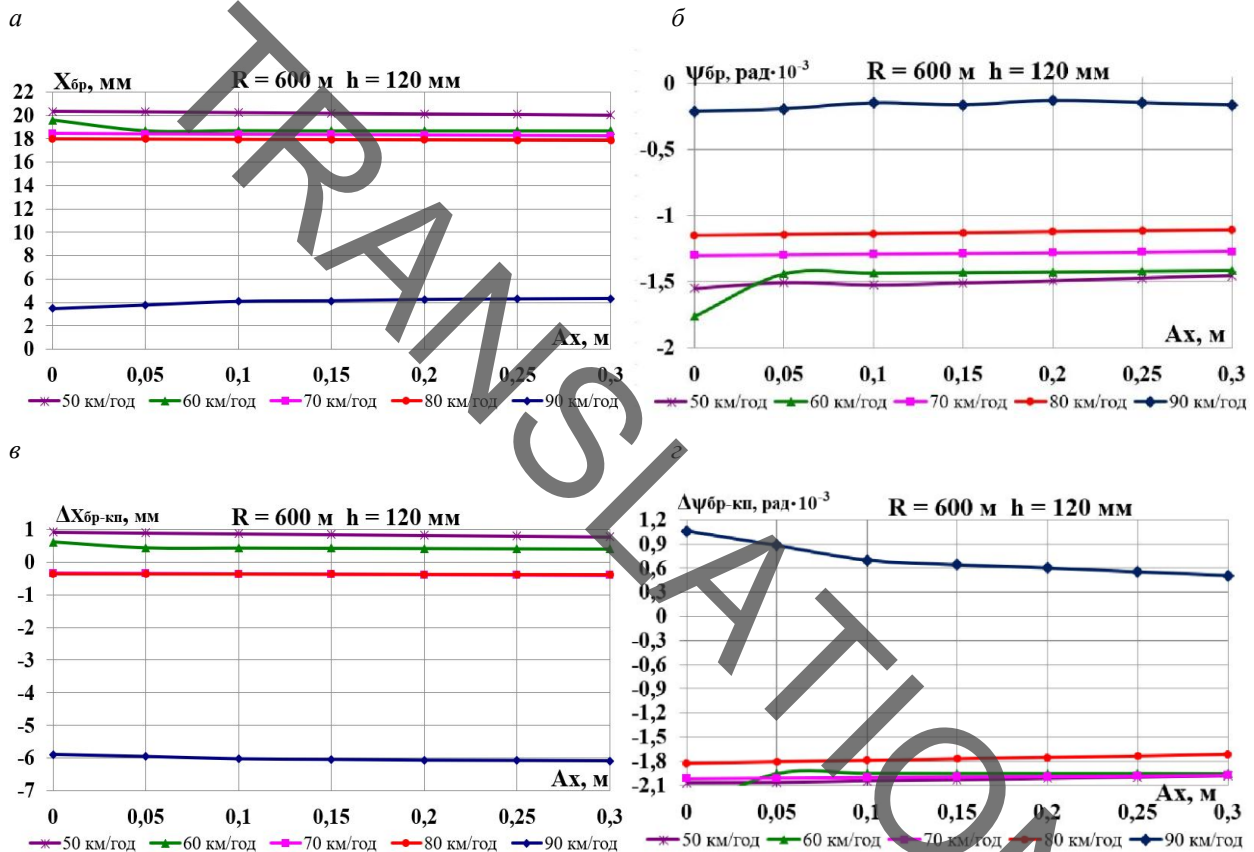


Рис. 4. Графіки залежності від зсуву вантажу в поздовжньому напрямку:

a – забігання бокових рам переднього візка;

б – виляння лівої бокової рами переднього візка;

в – взаємне поздовжнє переміщення бокової рами й буксового вузла передньої колісної пари;

г – взаємне виляння лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари

Наведені на рис. 4 результати теоретичних досліджень демонструють, що забігання бокових рам переднього візка $X_{бр}$ (рис. 4, *a*) та виляння лівої бокової рами переднього візка $\psi_{бр}$ (рис. 4, *б*) при швидкості руху в 90 км/год у 5 разів менші ніж в інтервалі 50 ÷ 80 км/год. Кути виляння $\psi_{бр}$ також мають знак «←», тобто

ліва боковина переднього візка повертається в площині колії проти напрямку кривої. Значне збільшення кутів виляння колісної пари $\psi_{кп}$ відбувається за рахунок істотних взаємних поздовжніх переміщень бокової рами й буксового вузла передньої колісної пари $\Delta X_{бр-кп}$ (рис. 4, *в*), а також виляння лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари через зсув бук

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в отворах бокових рам $\Delta\psi_{\text{бр-кп}}$ (рис. 4, з). Значення показників $\Delta x_{\text{бр-кп}}$ і $\Delta\psi_{\text{бр-кп}}$ від зсуву вантажу в поздовжньому напрямку майже не залежать.

Поперечне зміщення вантажу розглянуто в межах від $A_y = -0,15$ до $0,15$ м (рис. 5, б) [11].

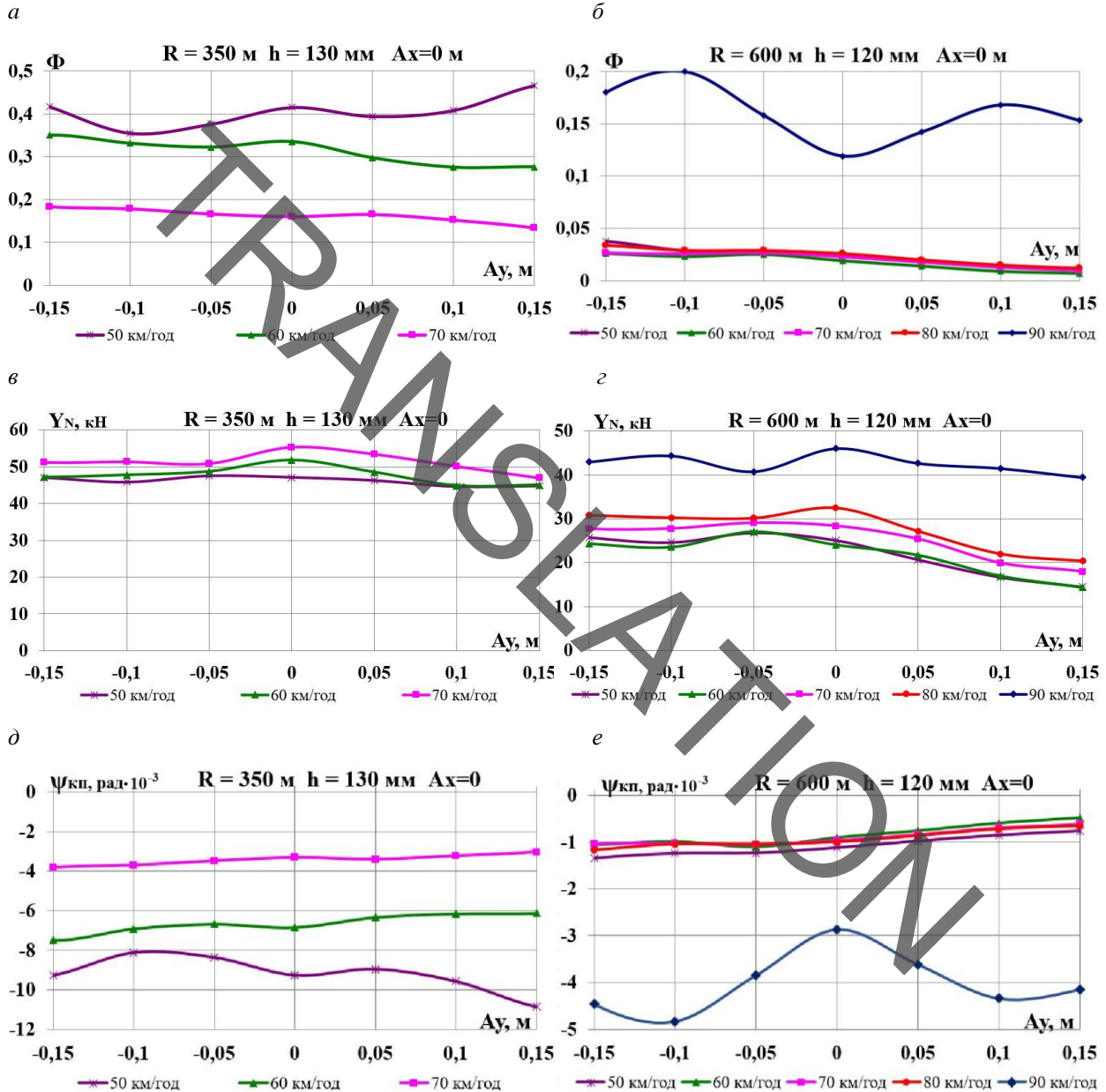


Рис. 5. Графіки залежності від зміщення вантажу в поперечному напрямку:

а, б – фактора зносу; в, г – напрямленої сили, що діє з боку колії на колесо; д, е – впливання колісної пари

На рис. 5 показано вплив на досліджувані показники поперечного зміщення центру мас вантажу A_y у кривих $R = 350$ м і $R = 600$ м відповідно. Зі збільшенням A_y фактор зносу Φ

(рис. 5, а) у кривій $R = 350$ м змінюється не так лінійно, як у разі поздовжнього зміщення, але також зменшується в разі підвищення швидкості. У кривій $R = 600$ м Φ зменшується за ра-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

хунок розвантаження колеса, що набігає. Винятком із загальної картини, як і в попередньому випадку, є швидкість руху 90 км/год. Крива фактора зносу Φ (рис. 5, б) має екстремуми за $A_y = 0,1$ м в обох напрямках від осі симетрії вагона-платформи. У разі поперечного зміщення центра мас вантажу мають місце більші напрямлені сили Y_N (рис. 5, в, г) й кути

вильання $\psi_{кп}$ (рис. 5, д, е) у кривих $R = 350$ м. Вильання колісної пари $\psi_{кп}$ за швидкості 90 км/год у кривій $R = 600$ м також значно відрізняється від інтервалу швидкостей 50 ÷ 80 км/год та направлені в площині колії проти напрямку в обох кривих.

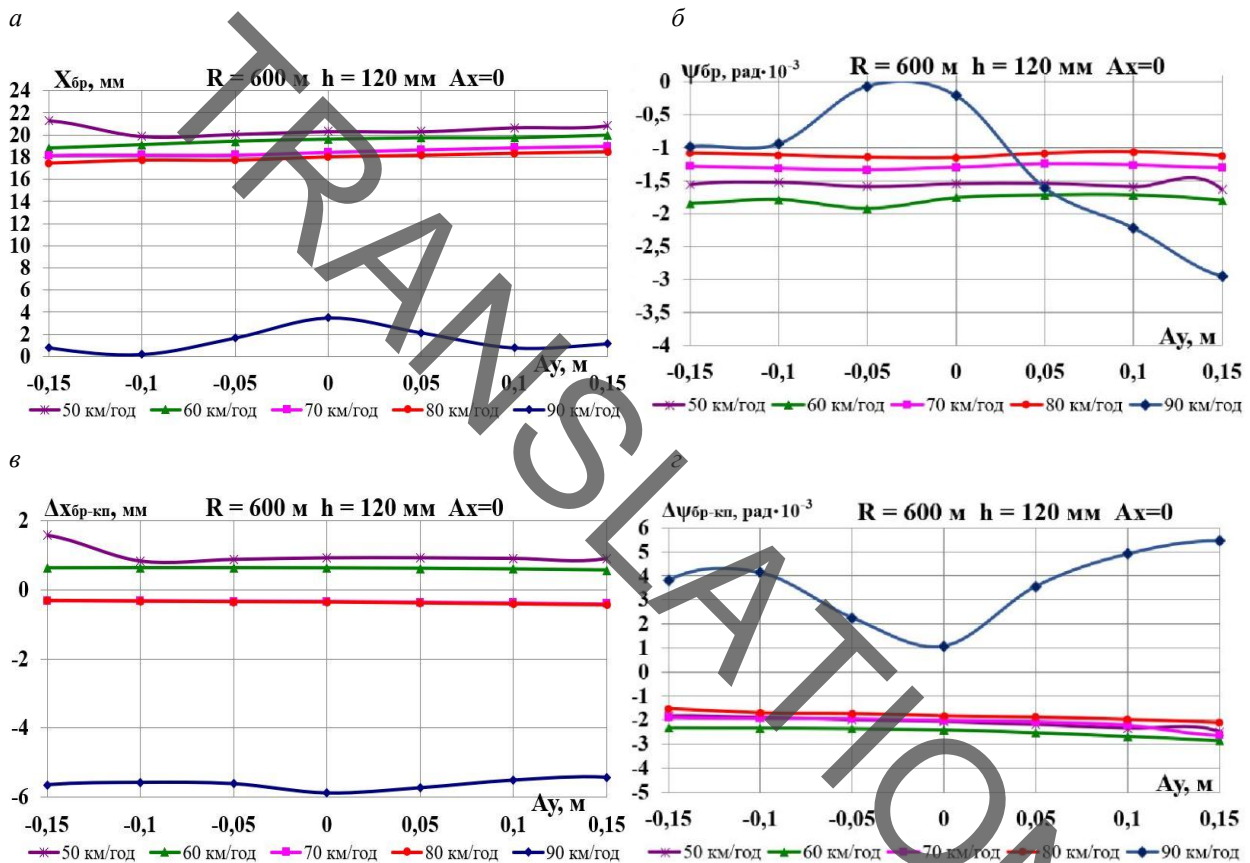


Рис. 6. Графіки залежності від зсуву вантажу в поперечному напрямку:

а – забігання бокових рам переднього візка;

б – вильання лівої бокової рами переднього візка;

в – взаємне поздовжнє переміщення бокової рами й буксового вузла передньої колісної пари;

г – взаємне вильання лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари

Графічні залежності, наведені на рис. 6, демонструють, що забігання бокових рам переднього візка $X_{бр}$ (рис. 6, а) за швидкості руху 90 км/год у 7 разів менші, ніж в інтервалі 50 ÷ 80 км/год й у 2 рази менші від аналогічного значення за поздовжнього зсуву. Порівнюючи рис. 4, б та рис. 6, б, зазначимо, що наявність поперечного зміщення центра мас вантажу на платформі призводить до значних змін харак-

теру вильання лівої бокової рами переднього візка $\psi_{бр}$ за швидкості руху 90 км/год. Кути вильання $\psi_{бр}$ (рис. 6, б) також мають знак «←». Як і за поздовжнього зсуву, значне збільшення кутів вильання колісної пари $\psi_{кп}$ відбувається за рахунок істотних взаємних поздовжніх переміщень бокової рами й буксового вузла передньої колісної пари $\Delta X_{бр-кп}$ (рис. 6, в), а також вильан-

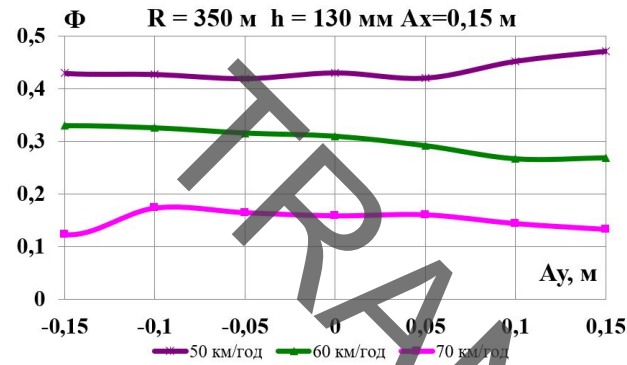
РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ня лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари через зсув букс в отворах боковин $\Delta\psi_{\text{бр-кп}}$ (рис. 6, з). За винятком швидкості 90 км/год значення показників $\Delta\chi_{\text{бр-кп}}$ й $\Delta\psi_{\text{бр-кп}}$ від зсуву вантажу в поперечному напрямку

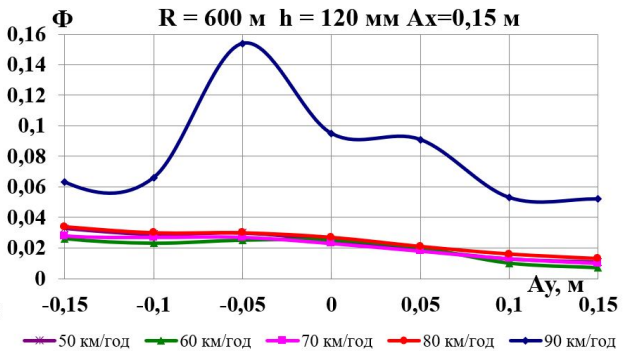
зменшуються в разі довантаження колеса, що не набігає.

Спільне зміщення центра мас уздовж осей X , Y розглянуто за A_y у межах від $-0,15$ до $0,15$ м й $A_x = 0,15$ м (рис. 7) [11].

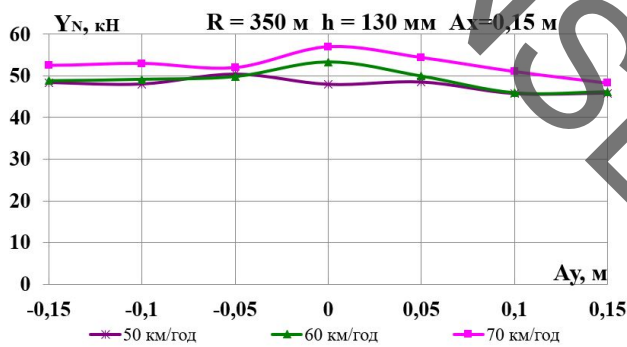
а



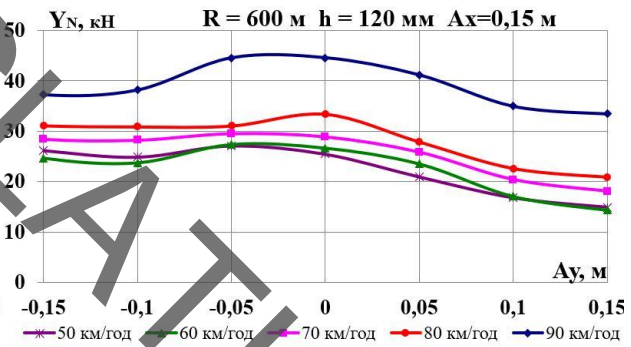
б



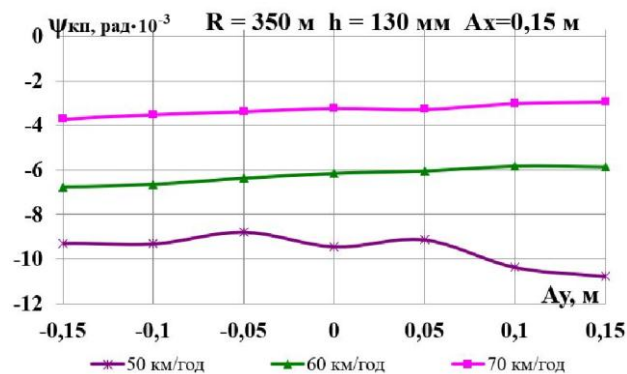
в



г



д



е

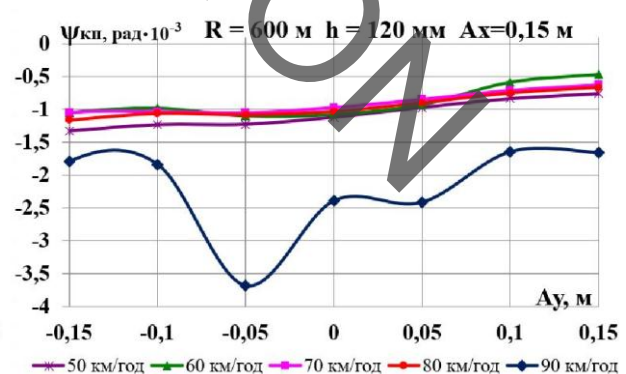


Рис. 7. Графіки залежності від одночасного зміщення вантажу в поперечному й поздовжньому напрямках:
а, б – фактора зносу; в, г – напрямленої сили, що діє з боку колії на колесо;
д, е – впливності колісної пари

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

На рис. 7 побудовані графіки залежності досліджуваних показників від величини зміщення центра мас вантажу в поперечному напрямку A_y за величини поздовжнього зміщення $A_x = 0,15$ м. Як видно з порівняння графіків, наведених на рис. 5 за $A_x = 0$ й рис. 7 за $A_x = 0,15$ м, є значні відмінності в показниках Φ та $\psi_{\text{кп}}$ у кривій $R = 600$ м за швидкості руху 90 км/год. Кути виляння $\psi_{\text{кп}}$ в обох кривих мають знак «-» і направлені проти напрямку кривої. Інші досліджувані показники залиша-

ються майже аналогічними як за поперечного, так і за наявності спільного поперечного й поздовжнього зміщення центра мас вантажу.

Аналізуючи залежності на рис. 8 можливо зробити висновок, що наявність спільного поздовжнього та поперечного зміщення центру мас значно впливає на характер забігання бокових рам переднього візка $X_{\text{бр}}$ (рис. 8, а) й виляння лівої бокової рами переднього візка $\psi_{\text{бр}}$ (рис. 8, б) за швидкості руху 90 км/год.

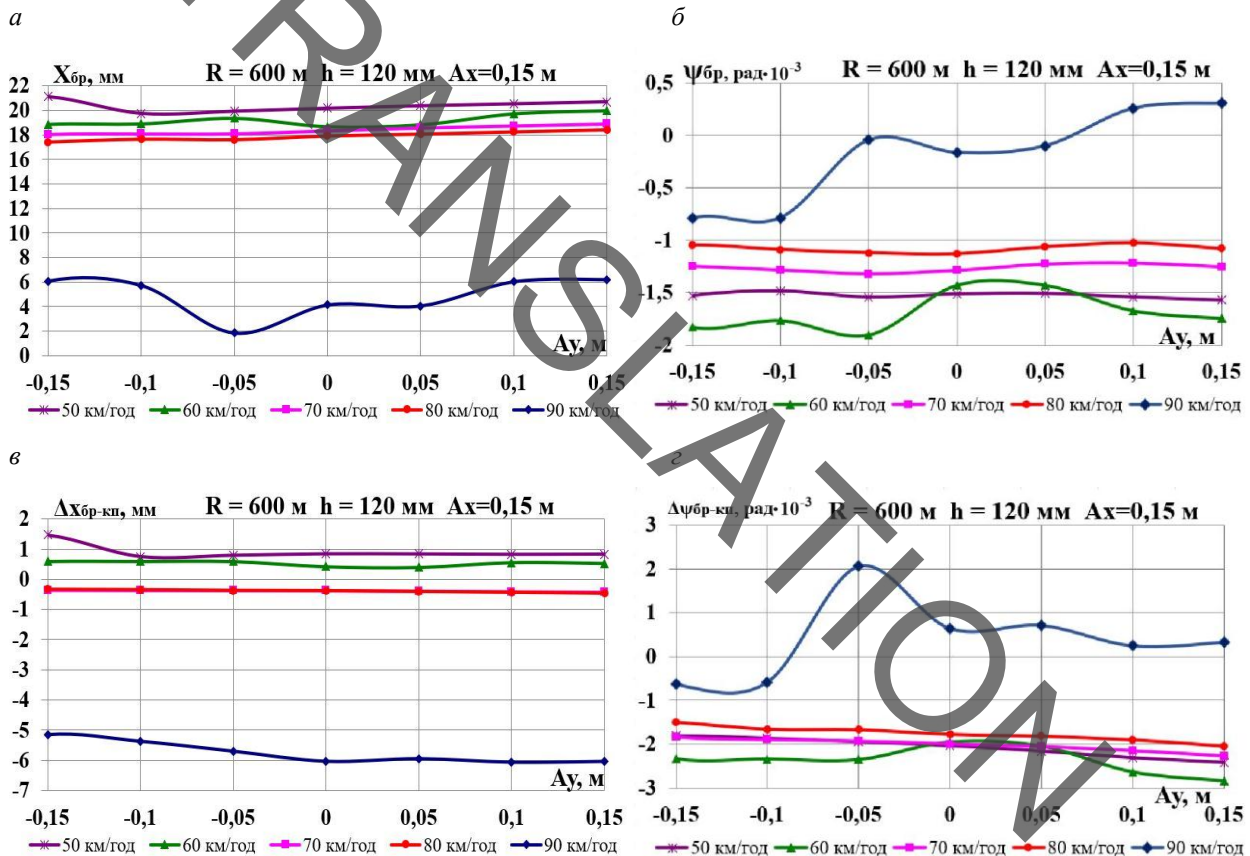


Рис. 8. Графіки залежності від зсуву вантажу в поперечному й поздовжньому напрямку:

а – забігання бокових рам переднього візка;

б – виляння лівої бокової рами переднього візка;

в – взаємне поздовжнє переміщення бокової рами й буксового вузла передньої колісної пари;

г – взаємне виляння лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари

У разі спільного поздовжнього та поперечного зсуву значне збільшення кутів виляння колісної пари $\psi_{\text{кп}}$ також відбувається за рахунок значних взаємних поздовжніх переміщень бокової рами й буксового вузла передньої колі-

сної пари $\Delta x_{\text{бр-кп}}$ (рис. 8, в) й виляння лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари через зсув букс в отворах бокових рам $\Delta \psi_{\text{бр-кп}}$ (рис. 8, г). На відміну від показників

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$\Delta x_{\text{бр-кл}}$, які майже не змінюються за наявності спільного поздовжнього й поперечного зсуву, значення показників $\Delta \psi_{\text{бр-кл}}$ значно менші.

У ГНДЛ ДМРС ДНУЗТ було проведено динамічні (ходові) випробування дослідного поїзда з метою визначення динамічної навантаженості контакту «колесо–рейка» й показників, що характеризують знос гребенів колісних пар і бокових поверхонь головок рейок, за найбільш імовірних в експлуатації відхилень розмірів елементів ходових частин вагонів від номінальних у діапазоні швидкостей 30–70 км/год. Було випробувано вантажні піввагони моделі 12–532 на трохелементних візках моделі 18–100, що мають різний стан ходових частин, який певною мірою міг вплинути на знос коліс і рейок. Для проведення експериментальних досліджень було сформовано дослідний поїзд із вагона-лабораторії, досліджуваних піввагонів і електровоза типу ЧС-2. Для отримання достовірної інформації про вплив відхилень розмірів елементів ходових частин на величину динамічної навантаженості контакту «колесо–рейка» всі етапи випробувань виконано на одній ділянці стикової колії [8].

Випробувано три завантажених піввагони з наступними особливостями в розмірах ходових частин:

1) піввагон № 1, який мав різницю баз бокових рам одного з візків 6 мм (2 184,5 і 2 190,5 мм);

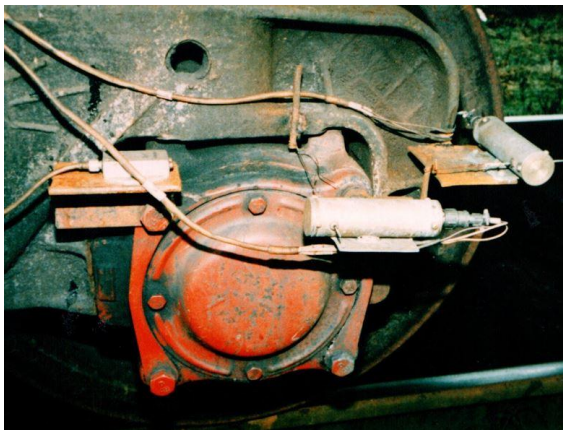
2) піввагон № 2, який мав відхилення в діаметрах коліс однієї колісної пари 3 мм (926 і 923 мм);

3) піввагон № 3, який мав мінімальні відхилення розмірів елементів ходових частин від номінальних і був узятий як вагон-еталон.

Під час проведення динамічних випробувань на дослідних піввагонах зареєстровано наступні величини: рамні сили для колісних пар; динамічні добавки вертикальних сил, які діяли на букси колісних пар; поздовжні й горизонтальні поперечні переміщення букс відносно бокових рам візків; горизонтальні поперечні прискорення букс; кути виляння надресорної балки відносно кузова; величини забігання бокових рам візків. У випробуваннях застосовано датчики переміщень і датчики забігання бокових рам візка.

На рис. 9, а наведено загальний вигляд одного з буксових вузлів дослідних вагонів, обладнаного датчиком прискорень і двома датчиками малих переміщень, а на рис. 9, б наведено вигляд дослідного візка 3-го вагона-еталона зі встановленими «в лінію» відеокамерами, датчиком для відмічання входження в криву, прикріпленим на кришці букси, датчиками малих і великих переміщень і датчиком прискорень.

а – а



б – б



Рис. 9. Обладнання дослідних вагонів вимірювальною апаратурою:
а – буксовий вузол дослідного вагона з датчиками прискорень і малих переміщень;
б – вигляд дослідного візка вагона-еталона

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

На рис. 10 наведені роздруківки записів зміни поздовжніх переміщень буксового вузла першої колісної пари відносно бокових рам і забігання бокових рам першого візка першого й третього вагонів під час руху дослідного поїзда зі швидкістю 70 км/год. Вихідна величина сумарного поздовжнього зазору букси в буксовому отворі становила 16 мм. Масштаб часу (по горизонталі) обрано таким чином, щоб на гра-

фіках були відображені записи щодо всієї дослідної ділянки. За тривалості роздрукування 100 с графіки відповідають приблизно двом кілометрам, пройденим дослідним поїздом по ділянці, у тому числі по прямій, кривій радіусом 600 м, короткій прямій між кривими, кривій радіусом 290 м і прямій. Із цих записів видно, що входження в криву радіусом 290 м має ударний характер.

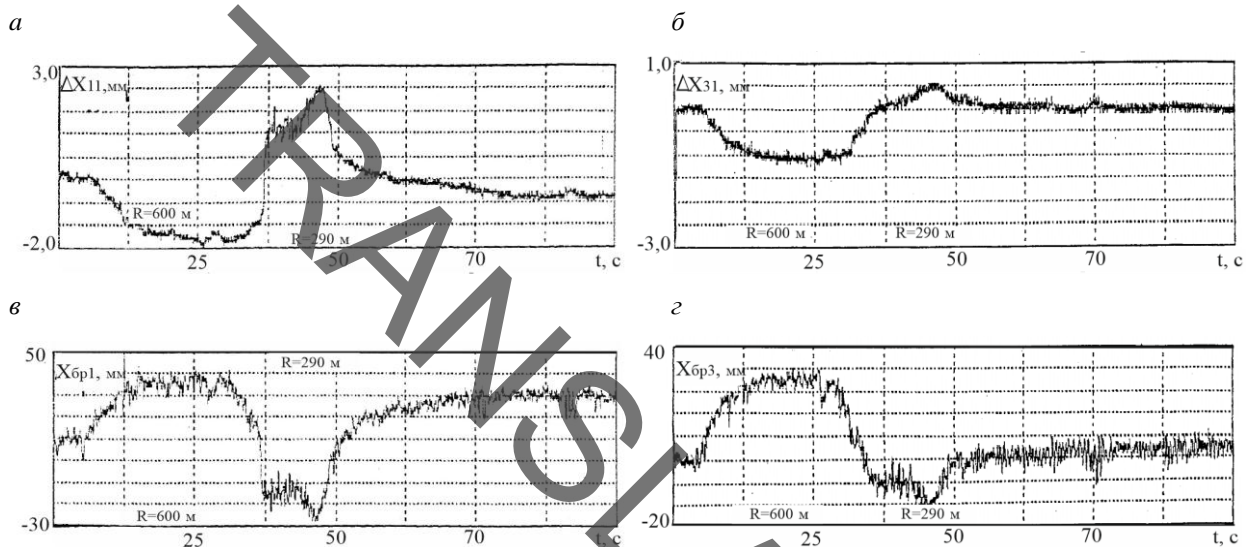


Рис. 10. Записи зміни:

a, б – поздовжніх переміщень буксового вузла першої колісної пари відносно бокової рами першого візка відповідно першого й третього вагонів;
в, г – забігання бокових рам першого візка відповідно першого й третього вагонів

Поздовжні переміщення буксових вузлів відносно бокових рам (рис. 10, *a, в*) порівняно невеликі, їх подвоєна амплітуда не перевищує 5 мм. Переміщення під час забігання бокових рам (рис. 10, *б, г*) мають досить великі величини, їх амплітуда досягає 40 мм. На записах переміщень буксових вузлів і забігання бокових рам видно зміщення, які відповідають зриву сил тертя під час входження вагона в криву радіусом 290 м. На підставі проведеної обробки результатів випробувань встановлено, що величини поздовжніх переміщень буксових вузлів $\Delta x_{\text{бр-кп}}$ дещо зростають зі збільшенням швидкості. Найбільші значення ΔX_{11} не перевищували 3–4 мм для першого вагона незалежно від радіуса кривої. Для другого вагона під час руху в кривій $R = 290$ м найбільші значення ΔX_{21} не перевищували 2–3 мм, а в кривій $R = 600$ м –

1–1,5 мм. Для третього вагона значення ΔX_{31} в кривій $R = 290$ м не перевищували 3,5 мм, а в кривій $R = 600$ м – 2–3 мм. Для порівняння: поздовжні переміщення букс відносно бокових рам вагона-платформи в кривій $R = 600$ м за результатами розрахунків склали 0,5–2 мм, а забігання бокових рам візка 17–22 мм в інтервалі швидкостей 50 ÷ 80 км/год за всіх варіантів зміщення центра тяжіння вантажу. Дещо менші значення параметрів можна пояснити більшою базою вагона-платформи.

Беручи до уваги той факт, що дослідний поїзд для проведення динамічних (ходових) випробувань було сформовано з піввагонів моделі 12–532, а теоретичні розрахунки наведено для вагона-платформи моделі 13–401, зауважимо, що отримані результати мають досить високий збіг. Результати розрахунків, як і дані експериментів, свідчать про те, що показники зносу

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в розглянутих випадках загалом зростають зі збільшенням швидкості руху. Величина показників зносу за інших рівних умов під час руху вагонів у кривій радіусом 300 м вища ніж під час руху в кривій радіусом 600 м.

Наукова новизна та практична значимість

У процесі дослідження отримано такі наукові й практичні результати:

– застосовано математичну модель зчепу з п'яти вантажних вагонів для вивчення впливу особливостей завантаження вагона-платформи на величину фактора зносу пари «колесо-рейка»;

– проведено оцінку таких показників, як фактор зносу, напрямлена сила й виляння колісної пари вантажного рухомого складу в разі зміщення центра мас вантажу під час руху по криволінійних ділянках залізничної колії;

– для встановлення ймовірної причини інтенсивного зносу коліс і рейок проаналізовано наступні параметри: забігання бокових рам переднього візка; виляння лівої бокової рами переднього візка; взаємне поздовжнє переміщення бокової рами й буксового вузла передньої

колісної пари; взаємне виляння лівої бокової рами візка відносно передньої колісної пари;

– досліджено вплив швидкості руху на означені показники.

Висновки

На підставі аналізу проведених теоретичних досліджень на прикладі вагона-платформи можна зробити наступні висновки:

– забігання бокових рам візка вагона-платформи в інтервалі швидкостей 50–80 км/год не впливають на фактор зносу коліс і рейок як за поздовжнього, так і за поперечного зміщення центра мас вантажу;

– поздовжні зміщення вантажу на вагонах-платформах не викликають збільшення досліджуваних показників;

– найбільш імовірною причиною інтенсивного зносу коліс і рейок за однакових умов руху є тимчасова зміна ходових характеристик деяких екіпажів, а саме збільшення кута набігання окремих коліс за рахунок повороту візка відносно колії або за рахунок повороту осі колісної пари через зсув букс в отворах бокових рам візка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бороненко, Ю. П. Инновации в тележках грузовых вагонов: реальность и перспективы / Ю. П. Бороненко, Е. А. Рудакова, А. М. Орлова // Наука и транспорт. – 2009. – № 8. – С. 14–17.
2. Данович, В. Д. Колебания в горизонтальной плоскости 4-осн. платформы с несимметрично расположенным тяжеловесным грузом / В. Д. Данович, П. С. Анисимов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1989. – № 3. – С. 5–9.
3. Данович, В. Д. Математическая модель пространственных колебаний сцепы пяти вагонов, движущихся по прямолинейному участку пути / В. Д. Данович, А. А. Малышева // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1998. – С. 62–69.
4. Данович, В. Д. Пространственные колебания вагонов на инерционном основании : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Данович Виктор Данилович ; Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1981. – 465 с.
5. Знос коліс та рейок при нерівномірному завантаженні піввагонів / Анжела О. Швець, О. М. Болотов, Л. С. Сапарова, Анжеліка О. Швець // Вісн. сертифікації залізн. трансп. – 2019. – № 1. – С. 4–17.
6. Определение показателей безопасности движения платформ с порожним автопоездом / А. В. Шатунов, В. В. Соборницкая, Е. Н. Ковтун, О. М. Маркова // Транспорт : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 7. – С. 116–120.
7. Петров, Г. И. Модернизация грузовых тележек: установка поперечной связи / Г. И. Петров, Н. Ю. Черняев, М. А. Мещеряков // Мир транспорта. – 2015. – № 5. – С. 58–62.
8. Разработка рекомендаций по снижению износа колес и рельсов за счет снижения сил динамического взаимодействия железнодорожных экипажей и пути с учетом стационарных и нестационарных режимов движения. В 3 т. Т. 3. Натурные исследования факторов, влияющих на повышенный износ рельсов

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- и гребней колес грузовых вагонов : отчет о НИР (заключ.) : 91.134.95.97/379.95.97 ЦТех / Днепропетр. нац. ун-т ж. д. трансп. им. акад. В. Лазаряна ; рук. Блохин Е. П., Пшинько А. Н. ; исп.: Данович В. Д. [и др.]. – Днепропетровск, 1998. – 190 с. – № ГР 0196U023134. – Инв. № 416(III).
9. Совершенствование конструкции тележек грузовых вагонов с целью снижения износа гребней колес и рельсов / И. Э. Мартынов, В. Г. Маслиев, С. Д. Мокроусов, В. П. Щербаков, В. И. Нестеренко // 36. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – 2013. – Вип. 139. – С. 25–34.
 10. Теоретическая оценка динамических качеств платформ, загруженных автопоездом с грузом / А. В. Шатунов, В. В. Соборницкая, Е. Н. Ковтун, О. М. Маркова // Транспорт : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 2000. – Вып. 3. – С. 21–27.
 11. Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). – Київ : Девольта, 2011. – Т. 1. – 436 с.
 12. Шатунов, А. В. Нагруженность сцепа из двух платформ при ресурсосберегающем способе транспортировки длинномерных грузов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Шатунов Александр Васильевич ; Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1992. – 17 с.
 13. Швець, А. О. Вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах на їх динамічні показники / А. О. Швець // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 5 (77). – С. 115–128. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/146432>
 14. Ashtiani, H. Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight cars with three-piece bogies / H. Ashtiani, S. Rakheja, A. K. W. Ahmed // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2017. – Vol. 231. – Iss. 8. – P. 877–891. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409716647095>
 15. Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear / E. P. Blokhin, O. M. Pshinko, V. D. Danovich, M. L. Korotenko // Railway Bogies and Running Gears : Proc. of the 4th Intern. Conf. / Technical University of Budapest. – Budapest, 1998. – P. 313–323.
 16. Effects of profile wear on wheel-rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout / J. Xu, P. Wang, L. Wang, R. Chen // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 1–14. doi: <http://doi.org/10.1177/1687814015623696>
 17. Generation mechanism and remedy method of rail corrugation at a sharp curved metro track with Vanguard fasteners [Електронний ресурс] / B. W. Wu, G. X. Chen, J. Z. Lu, Q. Zhu, X. Kang // Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control. – 2019. – Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1461348419845992> – Назва з екрана. – Перевірено : 26.06.2019. doi: <http://doi.org/10.1177/1461348419845992>
 18. Lack, T. Freight car bogie properties analysis by means of simulation computations / T. Lack, J. Gerlici, M. Manurova // Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 16. – Iss. 4. – P. 733–739.
 19. Light weight freight rolling stock bogie frame: Design methodology validated with field oscillation trials / S. Shukla, U. Kumar, S. K. Sharma, P. Gupta, A. Kumar // International Journal of Vehicle Structures and Systems. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 245–250. doi: <http://doi.org/10.4273/ijvss.9.4.10>
 20. Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics / C. Cole, M. Spiryagin, Q. Wu, Y. Q. Sun // Vehicle System Dynamics. – 2017. – Vol. 55. – Iss. 10. – P. 1498–1571. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2017.1330484>
 21. Shatunov, O. V. Study of dynamic indicators of flat car with load centre shift / O. V. Shatunov, A. O. Shvets // Наука та прогрес транспорту. – 2019. – № 2 (80). – С. 127–143. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/165160>
 22. Wu, Q. Longitudinal train dynamics: an overview / Q. Wu, M. Spiryagin, C. Cole // Vehicle System Dynamics. – 2016. – Vol. 54. – Iss. 12. – P. 1688–1714. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988>
Ye, Y. Small-amplitude hunting diagnosis method for high-speed trains based on the bogie frame's lateral-longitudinal-vertical data fusion, independent mode function reconstruction and linear local tangent space alignment [Електронний ресурс] / Y. Ye, J. Ning // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2019. – Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954409718825412> – Назва з екрана. – Перевірено : 26.06.2019. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409718825412>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А. В. ШАТУНОВ^{1*}, А. А. ШВЕЦ^{2*}, О. А. КИРИЛЬЧУК^{3*}, А. А. ШВЕЦ^{4*}

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 953 60 14, эл. почта shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

^{2*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela.shvets69@gmail.com, ORCID 0000-0002-8469-3902

^{3*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 27, эл. почта o.a.kirilchuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0565-1692

^{4*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 235 19 67, эл. почта angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-0717-2521

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА КОЛЕС И РЕЛЬСОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАГРУЗКЕ ПЛАТФОРМЫ

Цель. В научной работе нужно провести определение влияния несимметричной загрузки вагона-платформы на величину фактора износа пары «колесо–рельс» при изменении параметров, имеющих место в эксплуатации. **Методика.** Динамическую нагруженность вагона-платформы модели 13–401 с типовыми трехэлементными тележками исследовано с использованием модели пространственных колебаний сцепа из пяти вагонов с помощью математического и компьютерного моделирования. Теоретические расчеты выполнены для наиболее опасных участков железнодорожного пути – кривых малого и среднего радиуса в интервале допустимых скоростей движения. **Результаты.** Проанализированы показатели износа колес подвижного состава и рельсов на примере вагонов-платформ при наличии продольного и поперечного смещения центра масс груза относительно центра симметрии вагона. Для получения информации о влиянии допустимых отклонений расположения груза в вагоне на величину динамической нагруженности контакта «колесо–рельс» выполнены теоретические исследования пространственных колебаний рельсового экипажа и его взаимодействия с колеей. **Научная новизна.** Для определения износа пары «колесо–рельс» исследовано влияние смещения в двух направлениях от центральной оси симметрии центра тяжести груза с учетом величины скорости движения по кривых участках пути малого и среднего радиуса с применением математической модели сцепа из пяти грузовых вагонов. **Практическая значимость.** В результате проведенных теоретических исследований оценены такие показатели, как фактор износа, направленная сила и вилыние колесной пары грузового подвижного состава в случае смещения центра тяжести груза при движении по криволинейным участкам железнодорожного пути. Для установления возможной причины интенсивного износа колес и рельсов проанализированы параметры: забегание боковых рам передней тележки; вилыние левой боковой рамы передней тележки; взаимное продольное перемещение боковой рамы и буксового узла передней колесной пары; взаимное вилыние левой боковой рамы тележки относительно передней колесной пары.

Ключевые слова: груз; вагон-платформа; забегание боковых рам тележки; смещение центра тяжести груза; угол вилыния колесной пары; скорость движения; фактор износа

O. V. SHATUNOV^{1*}, A. O. SHVETS^{2*}, O. A. KIRILCHUK^{3*}, A. O. SHVETS^{4*}

^{1*}Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 953 60 14, e-mail shatunov220648@gmail.com, ORCID 0000-0002-1115-0093

^{2*}Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19, e-mail angela.shvets69@gmail.com, ORCID 0000-0002-8469-3902

^{3*}Dep. «Car and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 776 82 27, e-mail o.a.kirilchuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0565-1692

^{4*}Dep. «Car and Car Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (095) 235 19 67, e-mail angela_shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-0717-2521

RESEARCH OF WHEEL-RAIL WEAR DUE TO NON-SYMMETRICAL LOADING OF A FLAT CAR

Purpose. The paper is aimed at determining the influence of non-symmetrical loading of a flat car on the magnitude of the wear factor of a wheel-rail pair when changing the operation parameters. **Methodology.** The dynamic loading of 13-401 model flat car with typical three-piece bogies is studied using a model of spatial oscillations of a five-car coupling using mathematical and computer simulation. Theoretical calculations are performed for the most dangerous sections of the railway track – small and medium radius curves in the range of permissible speeds. **Findings.** The indicators of wear of the rolling stock wheels and the rails are analysed on the example of flat cars in the presence of a longitudinal and transverse displacement of the load mass centre relative to the car symmetry center. To obtain information on the effect of permissible deviations of the arrangement of cargo in the car on the magnitude of the dynamic loading of the wheel-rail contact, the authors performed theoretical studies of the spatial variations of the rail carriage and its interaction with the track. **Originality.** To determine the wear of the wheel-rail pair, the effect of displacement in two directions from the central axis of symmetry of the load gravity centre was studied, taking into account the value of the travel speed along the curved sections of the small and medium radius using a mathematical model of coupling of five freight cars. **Practical value.** As a result of the theoretical studies carried out, the authors assessed such factors as wear factor, directional force, and hunting of the wheel set of freight rolling stock in the event of load gravity centre displacement when moving along curved sections of the railway track. To establish the possible cause of intensive wear of the wheels and rails, the following parameters were analysed: lozengeing of front bogie side frames; hunting of the left side frame of the front bogie; mutual longitudinal movement of the side frame and axle box of the front wheel set; mutual hunting of the left side frame of the bogie relative to the front wheel set.

Keywords: load; flat car; lozengeing of bogie side frames; load gravity centre displacement; angle of wheel set hunting; travel speed; wear factor

REFERENCES

1. Boronenko, Y. P., Rudakova, Y. A., & Orlova, A. M. (2009). Innovatsii v tezhkakh gruzovykh vagonov: realnost i perspektivy. *Nauka i transport*, 5, 14-17. (in Russian)
2. Danovich, V. D., & Anisimov, P. S. (1989). Kolebaniya v gorizontальной ploskosti 4-osn. platformy s nesimmetrichno raspolozhennym tyazhelovesnym gruzom. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 3, 5-9. (in Russian)
3. Danovich, V. D., & Malysheva, A. A. (1998). Mathematical Model of Spatial Oscillations of the Coupling of Five Cars Moving Along a Rectilinear Section of the Track. In *Transport. Stress loading and durability of a rolling stock* (pp. 62-69). Dnepropetrovsk. (in Russian)
4. Danovich, V. D. (1981). *Spatial Cars Oscillations in Inertia Track*. (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering, Dnepropetrovsk. (in Russian)
5. Shvets, Angela O., Bolotov, O. M., Saparova, L. S., & Shvets, Angelika O. (2019). Wear Wheels and Rails at the Uneven Loading of Gondola Cars. *Visnyk sertyfikatsii zaliznychnoho transportu*, 1(53), 4-17. (in Ukrainian)
6. Shatunov, A. V., Sobornitskaya, V. V., Kovtun, E. N., & Markova, O. M. (2001). Opredelenie pokazatelej bezopasnosti dvizheniya platform s porozhnim avtopoezdom. *Transport*, 7, 116-120. (in Russian)
7. Petrov, G. I., Chernyaev, N. Y., & Meshcheryakov, M. A. (2015). Modernization of Cargo Bogies: Mounting of a Transverse Connection Assembly. *Mir transporta*, 5, 58-62. (in Russian)
8. Blokhin, E. P., Pshinko, O. M., & Danovich, V. D. (1998). *Razrabotka rekomendatsiy po snizheniyu iznosa koles i relsov za schet snizheniya sil dinamicheskogo vzaimodeystviya zheleznodorozhnykh ekipazhey i puti s uchetom statsionarnykh i nestatsionarnykh rezhimov dvizheniya* (Vol. 1-3). Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk. (in Russian)
9. Martynov, I. E., Masliev, V. G., Mokrousov, S. D., Nesterenko, V. I., & Shcherbakov, V. P. (2013). Improved design cargo trucks-cars out to prevent wear paddle wheels and rails. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainkoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*, 139, 25-34. (in Russian)
10. Shatunov, A. V., Sobornitskaya, V. V., Kovtun, E. N., & Markova, O. M. (2000). Teoreticheskaya otsenka dinamicheskikh kachestv platform, zagruzhenykh avtopoezdom s gruzom. *Transport*, 3, 21-27. (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

11. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov. Prilozhenie 3 k Soglasheniyu o mezhduarodnom zheleznodorozhnom gruzovom soobshchenii (SMGS)*. (2011). Kyiv: Devolta. (in Russian)
12. Shatunov, A. V. (1992). *Nagruzhenost stepa iz dvukh platform pri resursosberegayushchem sposobe transportirovki dlinnomernykh gruzov*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering, Dnepropetrovsk. (in Russian)
13. Shvets, A. O. (2018). Influence of the longitudinal and transverse displacement of the cargo gravity center in gondola cars on their dynamic indicators. *Science and Transport Progress*, 5(77), 115-128. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2018/146432> (in Ukrainian)
14. Ashtiani, H., Rakheja, S., & Ahmed, A. K. W. (2017). Influence of friction wedge characteristics on lateral response and hunting of freight cars with three-piece bogies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(8), 877-891. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409716647095> (in English)
15. Blokhin, E. P., Pshenko, O. M., Danovich, V. D., & Korotenko, M. L. (1998). Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear. *Railway Bogies and Running Gears: Proceedings of the 4th International Conference* (pp. 313-323). Budapest. (in English)
16. Xu, J., Wang, P., Wang, L., & Chen, R. (2016). Effects of profile wear on wheel-rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(1), 1-14. doi: <http://doi.org/10.1177/1687814015623696> (in English)
17. Wu, B. W., Chen, G. X., Lu, J. Z., Zhu, Q., & Kang, X. (2019). Generation mechanism and remedy method of rail corrugation at a sharp curved metro track with Vanguard fasteners. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*. doi: <http://doi.org/10.1177/1461348419845992> (in English)
18. Lack, T., Gerlici, J., & Manurova, M. (2016). Freight car bogie properties analysis by means of simulation computations. *Manufacturing Technology*, 16(4), 733-739. (in English)
19. Shukla, S., Kumar, U., Sharma, S. K., Gupta, P., & Kumar, A. (2017). Light weight freight rolling stock bogie frame: Design methodology validated with field oscillation trials. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 9(4), 245-250. doi: <http://doi.org/10.4273/ijvss.9.4.10> (in English)
20. Cole, C., Spiriyagin, M., Wu, Q., & Sun, Y. Q. (2017). Modeling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 55(10), 1498-1571. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2017.1330484> (in English)
21. Shatunov, O. V., & Shvets, A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat car with load centre shift. *Science and Transport Progress*, 2(80), 127-143. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2019/165160> (in English)
22. Wu, Q., Spiriyagin, M., & Cole, C. (2016). Longitudinal train dynamics: an overview. *Vehicle System Dynamics*, 54(12), 1688-1714. doi: <http://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988> (in English)
23. Ye, Y., & Ning, J. (2019). Small-amplitude hunting diagnosis method for high-speed trains based on the bogie frame's lateral-longitudinal-vertical data fusion, independent mode function reconstruction and linear local tangent space alignment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. doi: <http://doi.org/10.1177/0954409718825412> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.03.2019

Прийнята до друку: 08.07.2019