

Методи досліджень і вимірювальні прилади

УДК 629.3.027.5

Пожидаєв С., канд. техн. наук, Шкарівський Г., канд. техн. наук (НУБіП України)

Експериментальна перевірка взаємозв'язку крутного моменту і повної колової сили еластичного колеса

ГОСТ 17697-72 вказує, що перетворення крутного моменту еластичного колеса в його повну колову силу визначається радіусом кочення без ковзання. Однак зараз панує думка, що це перетворення визначається динамічним радіусом колеса. Експериментальна перевірка показала, що ця думка помилкова. Динамічний радіус не впливає на повну колову силу еластичного колеса. Його кінематичні і силові властивості визначаються радіусом кочення без ковзання.

Ключові слова: крутний момент колеса, повна колова сила, динамічний радіус, радіус кочення без ковзання.

Вступ. Тягове колесо – це пристрій, який перетворює підведену до нього енергію обертального руху в механічну роботу поступального переміщення. Вихідними показниками роботи колеса є його теоретична швидкість руху і повна колова сила. У теоретичну швидкість руху v_T перетворюється кутова швидкість обертання колеса ω :

$$v_T = \omega r_k, \quad (1)$$

де r_k – радіус кочення без ковзання, який визначається як відношення теоретичної швидкості поступального руху колеса до кутової швидкості його обертання [1, п. 29].

А в повну колову силу колеса $P_{ко}$, перетворюється прикладений до нього крутний момент M :

$$P_{ко} = M / r, \quad (2)$$

де під r можуть матися на увазі дві різні фізичні величини: динамічний радіус r_d , який являє собою відстань від осі обертання колеса, яке котиться, до опорної поверхні [2; 3], або радіус кочення без ковзання r_k

[1; 4-6].

Але ці два радіуси розрізняються своїми визначеннями, фізичним змістом і навіть одиницями виміру: динамічний радіус вимірюється в метрах, а радіус кочення – в м/рад. У жорстких коліс ці радіуси практично однакові, але у коліс, обладнаних високоеластичними шинами низького тиску, відмінності між їхніми значеннями можуть досягати 25 % [4]. Така неоднозначність співвідношення (2) неприпустима. Це типовий приклад наукової проблеми. Без її розв'язання теорія кочення еластичних коліс не може претендувати на достовірність результатів. Їх завжди можна оскаржити, протиставивши істотно інші результати.

Основна частина. У роботах [7, 8] була зроблена спроба вирішити цю проблему експериментально. Однак випробовування проводилися з шинами, в яких різниця між радіусом кочення і динамічним радіусом була незначна, а в процесі випробувань не було технічної можливості виключити вплив моменту опору перекочуванню, який збільшує невизначеність результатів. Через це відмінності між отриманими результа-

тами виявилось співставними з похибкою досліду, що не дало можливості зробити якісь безспірні висновки.

У теоретичних роботах [9, 10] стверджується, що взаємозв'язок між прикладеним до колеса крутним моментом і його повною коловою силою визначається радіусом кочення без ковзання. Застосування динамічного радіуса вважається помилковим, бо воно суперечить закону збереження енергії. Однак експериментального підтвердження цих висновків немає.

Метою роботи є експериментальна перевірка гіпотези про те, що співвідношення між крутним моментом і повною коловою силою еластичного колеса визначається його радіусом кочення без ковзання. Предметом дослідження є співвідношення (2).

Експериментальні дослідження проводились з механічною моделлю еластичного колеса, яка могла мати динамічний радіус, що відрізнявся від радіуса кочення на $\pm 30\%$. Передбачалося, що з похибкою результатів експерименту не більше 3% це повинно забезпечити отримання переконливої відповіді на запитання, який саме з радіусів впливає на співвідношення між крутним моментом еластичного колеса і його повною коловою силою.

Зі співвідношення (2) випливає, що перетворення підведеного до колеса крутного моменту M у повну колову силу $P_{\text{ко}}$ однозначно визначається його радіусом r . Усі інші конструкційні параметри колеса і показники, які характеризують процес кочення і взаємодії колеса із зовнішнім середовищем, на це перетворення не впливають. У будь-якому іншому випадку співвідношення (2) включало б і інші змінні величини.

Наприклад, у вираз (2) не входить нормальна реакція дороги на колесо. Це означає, що вона не впливає на співвідношення величин M і $P_{\text{ко}}$. Отже, випробування можна проводити за будь-якого значення цієї реакції, навіть за нульового. Тобто, модель колеса не обов'язково повинна спиратися на деяку поверхню. Повну колову силу $P_{\text{ко}}$ можна вимірювати за силою натягу шнура, прикріпленого до бігової доріжки моделі. Це спростить конструкцію експериментальної установки і виключить вплив моменту опору коченню колеса на результати дослідів.

Швидкість обертання колеса теж не входить у рівність (2). Отже, випробування можна проводити за будь-якої швидкості, включаючи і нульову. Модель колеса повинна мати можливість вільного обертання, але в процесі проведення експериментів воно не обов'язкове. Прикладений до колеса крутний момент буде врівноважуватися реакцією шнура, який зв'язує бігову доріжку з силовимірювальним пристроєм, модель за таких умов буде перебувати в нерухомому стані.

На підставці 1 експериментальної установки (рис. 1) закріплено щит 2 з підшипниковий вузлом, у якому встановлено водило. До водила прикріплена права боковина автомобільної шини 3, ліва боковина шини видалена. Для збільшення жорсткості бігової частини шини на неї насаджений обід 4 велосипедного колеса, ободова стрічка якого прийнята за бігову доріжку моделі колеса. Периметр ободової стрічки дорівнює $1,708$ м, що відповідає радіусу $0,272$ м, який розглядається як радіус кочення без ковзання. Для

вимірювання повної колової сили, яка діє на ободі, до нього прикріплено шнур 5, другий кінець якого приєднаний до електронного динамометра 6. З правого боку щита 2 (рис. 1 б) на хвостовику водила встановлено шків 13 діаметром $0,300$ м, він імітує другу бігову доріжку колеса з радіусом кочення $0,150$ м.

Усередині шини розташована маточина 7, вісь якої встановлена в підшипниковому вузлі 8, прикріпленому до повзуна 12. Повзун міг бути зафіксованим у трьох різних положеннях, розташованих у напрямку зображеної на рис. 1 а білої стрілки. Це давало можливість утримувати маточину 7 по центру колеса або в зміщених на $0,082$ м вправо або вліво положеннях.

До лівого кінця осі маточини 7 прикріплено велосипедне колесо 9 з таким же ободом, як і обід 4. До колеса 9 за допомогою шнура 10 приєднаний вантаж 11, призначений для створення на маточині 7 крутного моменту. Вага вантажу, визначена тим же електронним динамометром, дорівнює $5,00$ кгс, що забезпечує утворення фіксованого крутного моменту $1,36$ кгс·м.

На маточині 7 встановлено чотири пари роликів 14 (рис. 2 а), які взаємодіють з двома перехресно прикріпленими до шини гумовими джгутами 15. За середнього положення маточини радіус кочення і динамічний радіус моделі колеса однакові і рівні $0,272$ м.

За правого положення маточини динамічний радіус колеса дорівнює $r_d = 0,190$ м (рис. 2 б) у той час як радіус кочення, виміряний по ободовій стрічці велосипедного обода 4, залишається рівним $0,272$ м. За лівого положення маточини динамічний радіус дорівнює $0,354$ м з тим же радіусом кочення $0,272$ м. У реальному колесі отримання такого співвідношення радіусів неможливе, але в конструкції експериментальної установки це було передбачено.

У табл. 1 наведено план експериментів і отримані результати. У всіх точках плану на маточину колеса діяв один і той же крутний момент, рівний $1,36$ кгс·м.

У кожній з точок 1 і 3 плану експериментів значення радіуса кочення і динамічного радіуса були однакові: в точці 1 вони рівні $0,150$ м, а в точці 3 – $0,272$ м. Прогнозні (розрахункові) значення повної колової сили в цих точках, обчислені за співвідношенням (2) в припущенні ідеальності моделі колеса, рівні відповідно $9,07$ кгс і $5,00$ кгс.

Середні арифметичні значення результатів дослідів у цих точках плану дорівнюють відповідно $9,05$ кгс і $4,94$ кгс, що відрізняється від прогнозних значень відповідно на $0,2\%$ і $1,2\%$.

З цього випливає: а) установка працездатна, припущення, прийняті для спрощення її конструкції, були правильними; б) механічна добротність установки досить висока.

Проте із зазначених результатів неможливо визначити, який саме радіус колеса зумовлює зміни повної колової сили від $4,94$ кгс до $9,05$ кгс – динамічний чи кочення.

Для цього необхідно порівняти результати дослідів в точках 2, 3 і 4 плану, які розрізняються лише значенням динамічного радіуса. З них випливає, що **зміна цього радіуса від $0,190$ м до $0,354$ м (в $1,86$ разів) абсолютно не впливає на повну колову силу**. Її середні значення за згаданих значень динамічного радіуса однакові – $(4,80 \pm 0,01)$ кгс. Тобто динамічний

радіус буквально «не працює».

Деяке систематичне зміщення спостерігається тільки в точці 3 плану, де повна колова сила зросла до 4,94 кгс. Але це пояснюється зменшенням внутрішніх сил тертя установки, що спостерігається у точці 3 плану (за центральної установки маточини).

Повертаючись до точок 1 і 3 плану, слід зробити висновок, що отримана в них зміна повної колової сили зумовлена відмінностями в значеннях радіуса кочення, але не динамічного радіуса колеса.

Отже, гіпотеза про визначальну роль радіуса кочення приймається. Додатковим аргументом на користь цього рішення є те, що застосування радіуса кочення забезпечує однорідність розмірностей правих і лівих частин рівностей (1) і (2), яка є обов'язковою умовою правильності будь-яких математичних співвідношень. А саме, добуток величин ω і r_k , одиницями вимірювання яких є рад/с і м/рад відповідно, приводить до одиниці в правій частині співвідношення (1), що дорівнює м/с, що і потрібно. А частка від ділення крутного моменту M на r_k , якщо застосовувати коректну одиницю моменту Н·м/рад [11], приводить до одиниці правої частини співвідношення (2) ньютон, що і потрібно. Якщо ж у цих співвідношеннях застосовувати динамічний радіус, вимірюваний у метрах, то одиниці вимірювання їхніх лівих і правих частин виявляться різними, що свідчить про помилковість співвідношень.

Отже, приймаємо рішення, що співвідношення (2) повинно мати вигляд:

$$P_{\text{ко}} = M / r_k. \quad (3)$$

Звідси, уявлення про визначальну роль динамічного радіуса є помилковим. Воно спирається на відомий постулат про те, що взаємозв'язок сили і моменту здійснюється за посередництва плеча сили, яке дорівнює відстані від центру обертання до лінії дії сили. Але цей постулат, як було показано в роботі [11], не має загального характеру. Він справедливий тільки для абсолютно твердих тіл, до яких еластичні колеса не відносяться.

А механічне застосування принципу затвердіння, до якого апелюють захисники динамічного радіуса, для еластичних шин теж неправомірне [10]. Загальний характер мають лише закони збереження, якими і слід керуватися, математично описуючи роботу еластичного колеса.

Отримані в цій роботі результати вимагають перегляду наявних поглядів на застосування радіусів у теорії кочення еластичних коліс. А саме, сьогодні в цій теорії застосовуються два радіуси – динамічний r_d і радіус кочення r_k [2]. Останній являє собою величину, рівну відношенню поздовжньої складової дійсної поступальної швидкості руху колеса v_d до його кутової швидкості обертання ω [1, п.27]:

$$r_k = v_d / \omega \equiv v_T (1 - s) / \omega, \quad (4)$$

где s – коефіцієнт поздовжнього ковзання колеса [1, п. 29].

У понятті цього радіуса механічно змішані дві різні і не пов'язані між собою характеристики процесу руху колеса – перекочування і поздовжнє ковзання, перша з яких обумовлена внутрішніми властивостями

колеса, а друга – переважно умовами його взаємодії з дорогою. Тобто, він являє собою штучну конструкцію, призначення і сфера застосування якої проблематичні.

З цієї роботи випливає, що радіуси r_d і r_k не потрібні в теорії кочення еластичного колеса. Вона не потребує значень цих радіусів, вони безпідставно привнесені у цю теорію, для неї необхідним і достатнім є один-єдиний радіус – кочення без ковзання r_k . Саме він, а не радіуси r_d і r_k , логічно затребуваний у співвідношеннях (1) і (2), які характеризують вихідні показники роботи колеса як перетворювача енергії обертального руху в механічну роботу поступального переміщення.

А характер і ступінь використання згаданих вище вихідних показників роботи коліс у конкретних умовах роботи машини визначається за посередництва абсолютно інших характеристичних величин, які не мають ніякого відношення до радіусів колеса. Наприклад, теоретична швидкість руху може бути розкладена на дійсну швидкість руху і швидкість ковзання (буксування), для цього додатково буде потрібне значення коефіцієнта поздовжнього ковзання s . Повна колова сила може бути розкладена на компоненти, які відповідають окремим видам сил опору рухові машини.

Зокрема, встановлення факту, що радіуси r_d і r_k не мають відношення до теорії кочення еластичних коліс, має і сумний бік. З нього випливає, що безліч раніше виконаних теоретичних і експериментальних досліджень, присвячених вивченню залежності цих радіусів від можливих режимів та умов роботи еластичних коліс, були абсолютно непотрібними ...

Цікаві результати навів Е.Б. Станкевич [8]. На широкому експериментальному матеріалі він виявив, що значення емпіричного коефіцієнта β , який характеризує взаємозв'язок крутного моменту і колової сили колеса, практично не залежать від механічних властивостей опорної поверхні, колової сили, крутного моменту, нормального навантаження і тиску повітря в шині. Тобто, він встановив, що для кожної окремо взятої шини коефіцієнт β є практично постійною (фіксованою) величиною, яка не залежить від перерахованих вище чинників. На підставі цього Е. Б. Станкевич зробив висновок, що поняття коефіцієнта β еквівалентне вільному радіусу колеса r_0 , який теж є постійною величиною. Однак вільний радіус не має відношення до процесу кочення, тому логічніше прирівнювати коефіцієнт β до радіуса кочення без ковзання r_k , який теж є постійною величиною, а його значення близьке до значення вільного радіуса r_0 .

А саме, радіус кочення r_k є фіксованою величиною, яка дорівнює відношенню теоретичної швидкості руху колеса v_T до кутової швидкості його обертання ω в строго регламентованому режимі роботи – під час кочення без ковзання, тобто за мінімально можливою коловою силою і відсутності крутного моменту. Радіус кочення радіальних шин майже не залежить від їх нормальної деформації: «зі зниженням тиску в шині з 1,4 до 0,6 кгс/см² статичний радіус зменшується на 2,9 %, а радіус кочення – всього на 0,8 % » [12]. Це обумовлено тим, що бігова частина радіальних шин «... веде себе під час кочення колеса подібно до тракторної гусеничної стрічки» [13, с. 38]. Шлях, який проходить

колесо за кожен оберт цієї недеформованої в поздовжньому напрямку стрічки, практично не залежить від нормальної деформації шини. Природно, що від неї не залежить і радіус кочення колеса, що являє собою $1/2\pi$ частину згаданого шляху.

Зі співвідношень (1) і (3) випливає, що одне і те ж фіксоване значення радіуса кочення r_k визначає одночасно як швидкісні, так і силові показники роботи еластичного колеса. Це явище не парадокс, а наслідок закону збереження енергії. Згідно з ним, виграш у силі можна отримати тільки за рахунок такого ж програшу в шляхові. Отже, кінематичні і силові властивості об'єктів Природи існують не "самі по собі", а у нерозривному зв'язку між собою. Пройдений колесом теоретичний шлях і колова сила пов'язані так, як пов'язані довжина і ширина прямокутника постійної площі за змін його пропорцій. А параметром, який пов'яже шлях та силу колеса, є радіус кочення без ковзання. Саме він забезпечує взаємну узгодженість цих показників, обумовлену законом збереження енергії. Причому, ця узгодженість зберігається за будь-яких режимів і умов роботи колеса. Наприклад, дійсна швидкість руху колеса може дорівнювати і нулю, але на теоретичну швидкість, яка визначається співвідношенням (1), це не впливає. Повна колова сила колеса може якнайрізноманітніше витратитися на подолання сил опору коченню, повітря тощо, але сума цих сил завжди визначається співвідношенням (3). Тому співвідношення (1) і (3) справедливі для всіх без винятку режимів і умов роботи еластичних коліс.

Отже, радіус кочення без ковзання r_k – це атрибут, найважливіший параметр еластичного колеса. У теорії кочення він відіграє таку ж роль фундаментальної константи, як і абсолютний нуль температури в термодинаміці. Тому навіть у випадку збігання значень радіусів r_k і r_d необхідно наголошувати, що застосовується радіус кочення без ковзання r_k , а не динамічний радіус r_d . Ігнорування цієї обставини буде являти собою принципову методичну неточність, яка означатиме ігнорування закону збереження енергії.

Висновок. Експериментальна перевірка, виконана на механічній моделі еластичного колеса, засвідчила, що динамічний радіус "не працює".

Взаємозв'язок між крутним моментом і повною коловою силою визначається радіусом кочення без ковзання r_k . Отже, цей радіус є найважливішим параметром (атрибутом) еластичного колеса. Саме він пов'яже воедино, згідно із законом збереження енергії, кінематичні і силові властивості колеса.

Всі інші радіуси колеса для теорії кочення не потрібні. Вільний, статичний та динамічний радіуси, як обґрунтовано зазначено в ГОСТ 17697-72, характеризують лише геометричні елементи і параметри колеса і лінії дії реакцій. Щодо радіусу кочення колеса r_k , то він являє собою штучну конструкцію, призначення і сфера застосування якої проблематичні.

Література

1. ГОСТ 17692 -72. Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов,

1972. – 24 с.

2. Вікович І.А. Теорія руху транспортних засобів. – Львів: Львівська політехніка, 2013. – 672 с.

3. Кутьков Г.М. Теория трактора и автомобиля. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 506 с.

4. Петрушов В.А., Шуклин С.А., Московкин В.В. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.

5. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.

6. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория. – Минск: Высшая школа, 1986. – 208 с.

7. Шабаров А.А. Отдельные вопросы процесса равномерного качения ведущего пневматического колеса // Исследование ходовых систем колесных тракторов. – Труды НАТИ. – Вып. 212. – М., 1971. – С. 3-30.

8. Станкевич Э.Б. Зависимость силового нагружения колеса от его геометрических параметров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – №9. – С. 6-9.

9. Пожидаев С. Про очевидне, але хибне рівняння у теорії кочення еластичного колеса // Техніка і технології АПК. – 2016. – № 8. – С. 15-19.

10. Пожидаев С. Про підставу, що призвела до хибного застосування динамічного радіуса у теорії кочення // Техніка і технології АПК. – 2016. – № 9. – С. 24 – 27.

11. Пожидаев С. Уточнення поняття моменту сили у механіці // Техніка і технології АПК. – 2018. – № 3. – С. 18 – 21.

12. Орлов В.А. Качение колеса с эластичной шиной постоянного периметра // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1972. – №2. – С. 39-40.

13. Работа автомобильной шины / Под. ред. В.И. Кнороза. М. – Транспорт, 1976. – 238 с.

Аннотация. ГОСТ 17697-72 указывает, что преобразование крутящего момента эластичного колеса в его полную окружную силу определяется радиусом качения без скольжения. Однако в настоящее время господствует мнение, что это преобразование определяется динамическим радиусом колеса. Экспериментальная проверка показала, что это мнение является заблуждением. Динамический радиус не влияет на полную окружную силу эластичного колеса. Его кинематические и силовые свойства определяются радиусом качения без скольжения.

Summary. GOST 17697-72 prescribes that the conversion of the elastic wheel torque into its full longitudinal force is determined by the effective rolling radius without sliding. However, at present the opinion prevails that this transformation is determined by the loaded radius of the wheel. Experimental verification has shown that this opinion is a fallacy. The loaded radius does not affect the full longitudinal force of the elastic wheel. Its kinematic and power properties are determined by the effective rolling radius without slipping.

Стаття надійшла до редакції 21 січня 2019 р.