

Ю.Ю. Буренніков, к.е.н., доц.
О.Л. Добровольський, асист.
В.В. Степанов, студ.

Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ШИНИ З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Отримані залежності дозволяють визначити роботу сили тертя в контактній шини з опорною поверхнею. Результати розрахунків представлено графічно.

Вступ. Незважаючи на численні роботи, присвячені вивченню взаємодії рухомого колеса з опорною поверхнею, відомо лише невелика кількість публікацій, у яких досліджуються загальні питання теорії кочення деформованого колеса. При цьому спостерігається своєрідна спеціалізація: деякі дослідники розглядають кочення колеса з урахуванням сил, що діють тільки в його серединній площині, інші – тільки під дією бічних сил, треті – вивчають стаціонарний рух, четверті – нестаціонарний, переносючи на нього результати, отримані в стаціонарному випадку без оцінювання меж придатності подібної процедури.

На сьогодні питання визначення енергетичних втрат під час руху автомобіля не можна вважати цілком вирішеним. Аналіз робіт з тематики дослідження свідчить про складність і невирішеність такої проблеми, як вплив кутів установки керованих коліс на опір руху і, відповідно, на роботу тертя в плямі контакту шини з опорною поверхнею.

Виходячи з викладеного вище, актуальним є визначення енергетичних втрат на кочення під час руху автомобіля.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Г.А. Гаспарянц [1] вперше як критерій для оцінювання зносу шин прийняв роботу тертя у зоні контакту. Він отримав аналітичну залежність для визначення сумарної роботи тертя при розрахунковому проковзуванні в зоні виходу з контакту:

$$A_2 = \frac{K_y \left(\frac{K_y + S_1}{C_b} + \frac{S_1}{2} \right)^3}{3S_1 \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{K_y - S_1}{C_b} - \frac{S_1}{2} \right)} \varepsilon, \quad (1)$$

де K_y – коефіцієнт опору бічному відведенню; C_b – бічна жорсткість; S_1 – довжина контакту; ε – кут відведення.

Однак ця формула справедлива лише при великих кутах відведення і зовсім непридатна при куті відведення, що знаходиться в межах нуля. У цьому випадку робота тертя виходить рівною нулю, а шина зношується, як відомо, за будь-яких умов кочення колеса.

У роботі [2] Г.Гента розглянув вплив вертикального навантаження і тиску повітря в шині на величину роботи тертя у зоні контакту. Він заявив, що збільшення навантаження на колесо при постійному тиску в шині або зниження тиску при постійному навантаженні на колесо призводить до збільшення роботи тертя. У даній роботі також розглядається вплив бічного відведення на роботу сил тертя, але не розглядається вплив конструкції шини.

Багато робіт, присвячених дослідженню зв'язку між тертям та зносом, виконав Д.Лучіні [3]. На його думку, знос залежить не тільки від зносостійкості матеріалу протектора, а й значною мірою обумовлений силами, що діють на шину.

У роботі [4] представлено спосіб визначення правильності встановлення керованих коліс автомобіля за величиною втрат енергії на роботу тертя в контактній шини з опорною поверхнею. Однак і в даній роботі не показаний зв'язок роботи тертя з конструкцією шини.

Викладення основного матеріалу. Для визначення втрат енергії на роботу тертя в контактній шини з опорною поверхнею розглянемо розподіл нормальних контактних зусиль з урахуванням згинальної жорсткості брекера і радіального обтиснення протектора, використовуючи рівняння розтягнутої балки, підкріпленої пружною основою [5]:

$$EI \frac{d^4 \omega}{dx^4} - N \frac{d^2 \omega}{dx^2} + k_1 \omega = f(x), \quad (2)$$

де EI – жорсткість брекера на згин.

Як і в роботі [5], нормальне контактне зусилля вважаємо пропорційним радіальному обтисненню протектора, тобто приймаємо:

$$f(x) = \begin{cases} k_2 \cdot \Delta H & \text{при } |x| \leq x_0 \\ 0 & \text{при } |x| > x_0 \end{cases} \quad (3)$$

Підставляючи (3) у (2), отримуємо диференціальне рівняння:

$$EI \frac{d^4 \Delta H}{dx^4} - N \frac{d^2 \Delta H}{dx^2} + (k_1 + k_2) \Delta H = \frac{N}{R} + k_1 H - \frac{k_1}{2R} x^2. \quad (4)$$

Щоб обчислити роботу тертя поздовжніх дотичних зусиль припустимо, що вони мало впливають на розподіл нормальних контактних зусиль $q(x)$ і цим впливом можна знехтувати. Для обчислення дотичних зусиль знайдемо дотичні переміщення $u(x)$. Користуючись умовою, що бреккер не розтягується, отримаємо:

$$u(x) = \frac{1}{R} \int_0^x \omega(x) dx = \frac{1}{R} (h - a_0) x - \left(a_1 + \frac{1}{2R} \right) \frac{x^3}{3} - \frac{a_2}{\alpha} \operatorname{sh} \alpha x - \frac{a_3}{\lambda} \operatorname{sh} \lambda x, \quad (5)$$

У зоні контакту будемо розрізняти зону зчеплення $|x| < x_1$, де дотичні зусилля пропорційні дотичним переміщенням:

$$\tau(x) = k_3 u(x), \quad (6)$$

і зону ковзання $x_1 \leq |x| \leq x_0$, де дотичні зусилля пропорційні нормальним зусиллям:

$$\tau(x) = \varphi q(x) = \varphi k_2 \Delta H(x), \quad (7)$$

У виразі (6) коефіцієнт k_3 враховує роботу протектора на зсув. Його можна знайти за формулою:

$$k_3 = \frac{Knp \cdot Bn}{G}, \quad (8)$$

де G – модуль зсуву матеріалу протектора.

Умова безперервності дотичних зусиль при $x = x_1$ дає рівняння $k_3 u(x) = \varphi k_2 \Delta H(x)$, яке з урахуванням (5), (6), (7) приймає вигляд:

$$\frac{k_3}{R} \left((H - a_0) x_1 - \left(a_1 + \frac{1}{2R} \right) \frac{x_1^3}{3} - \frac{a_2}{\alpha} \operatorname{sh} \alpha x_1 - \frac{a_3}{\lambda} \operatorname{sh} \lambda x_1 \right) = \varphi k_2 \left(a_0 + a_1 x_1^2 + a_2 \operatorname{ch} \alpha x_1 + a_3 \operatorname{ch} \lambda x_1 \right). \quad (9)$$

Кінцевим виразом для визначення роботи тертя є інтеграл:

$$A_n = 2\varphi k_2 \int_{x_1}^{x_0} \Delta H(x) \cdot u(x) dx, \quad (10)$$

Варіюючи визначеними параметрами математичної моделі, такими як внутрішній тиск повітря в шині, навантаження на шину, ступінь зношеності протектора, конструктивні параметри шини (ширина бреккера і жорсткість боковини шини) стан дорожнього покриття, представлено результати теоретичного дослідження роботи сили тертя шини з опорною поверхнею (рис. 1–3).

На рисунку 1 наведено результати розрахунку залежності роботи тертя при зміні коефіцієнта зчеплення шини з дорогою. Встановлено, що коефіцієнт зчеплення змінює величину роботи в контакті шини за лінійним законом. При моделюванні взаємодії досліджуваних шин з дорогою характерно підвищення роботи тертя зі зростанням коефіцієнта зчеплення. Для досліджуваної шини збільшення роботи тертя складає від 9 до 16 мДж/см², при збільшенні коефіцієнта зчеплення від значення 0,3 (рух автомобіля по мокрій або засніженій дорозі) до 0,8 (рух по сухій асфальтобетонній дорозі).

На рисунку 2 наведено результати розрахунку впливу жорсткості боковини шини на величину роботи тертя. Жорсткісні характеристики боковини шини залежать від шаруватості каркаса і конструкції бреккерного поясу. Конструктивні рішення змінюють жорсткість боковини шини в межах $15 \times 10^4 - 4 \times 10^5$ Па. Збільшення жорсткості боковини шини в 2 рази веде до зниження роботи тертя на 40 %. Подальше підвищення жорсткості боковини підвищує роботу тертя в контакті. Найменша робота тертя отримана при жорсткості боковини в межах $35 \times 10^4 - 4 \times 10^5$ Па.

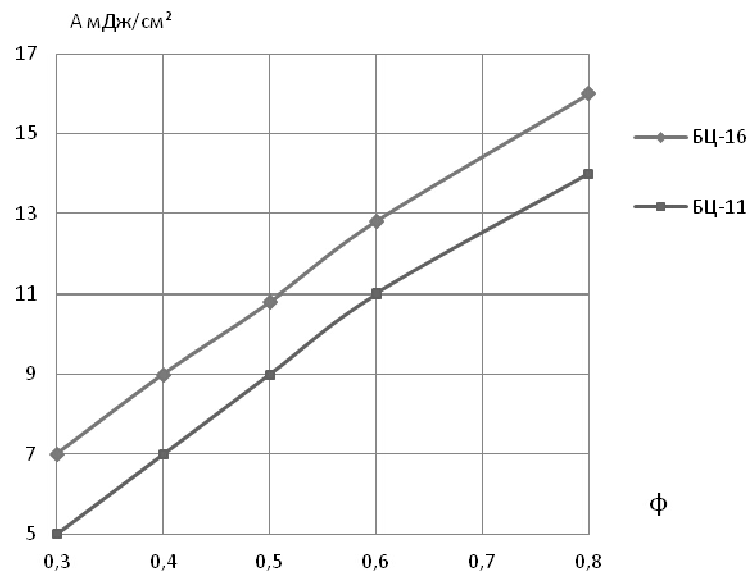


Рис. 1. Залежність роботи тертя від зміни коефіцієнта зчеплення шини з дорогою

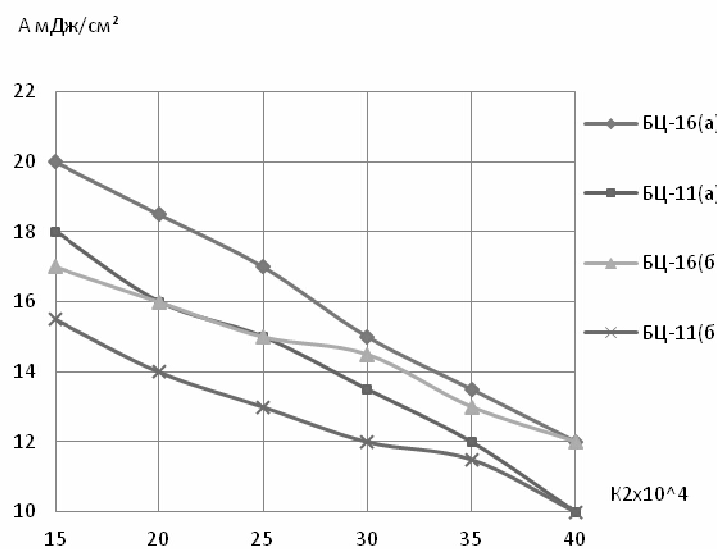


Рис. 2. Вплив жорсткості шини на величину роботи тертя:
а – з урахуванням зношення протектора;
б – без урахування

Результати розрахунку впливу тиску повітря в шині на роботу тертя у контакті наведено на рисунку 3. Видно, що навіть несуттєве неврахування зміни тиску повітря в шині призведе до серйозних похибок в розрахунках, близько 10 %. Причому зі зменшенням тиску ця різниця збільшується. Для досліджуваних шин характерно зменшення роботи тертя в контакті із збільшенням тиску повітря. Зменшення роботи тертя при збільшенні тиску від 0,16 до 0,24 МПа складає для розрахункової шини 7 мДж/см². Це зниження роботи тертя пояснюється зменшенням площі контакту, яке викликане підвищенням тиску повітря і зменшенням зони ковзання.

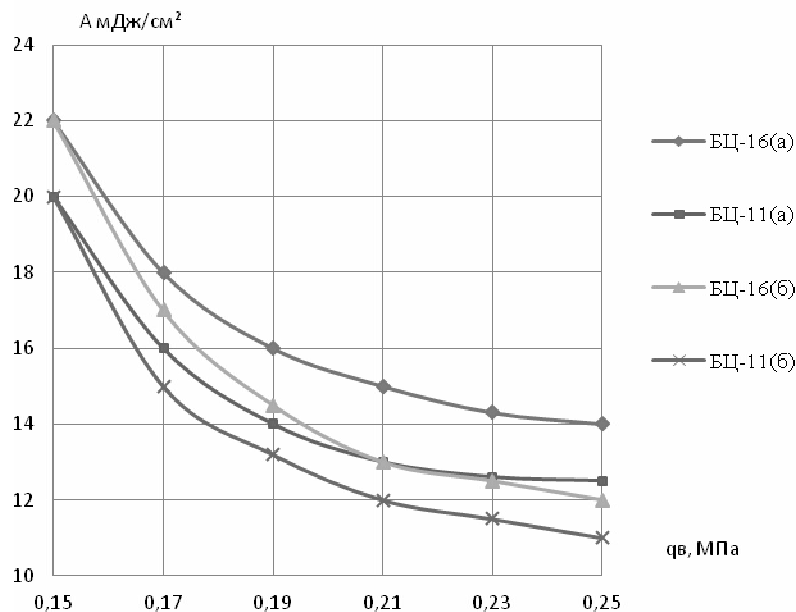


Рис. 3. Вплив тиску повітря в шині на роботу тертя в контактi:
 а – з урахуванням жорсткості шини;
 б – без урахування

Висновки. Враховуючи жорсткість протектора значення роботи тертя дещо зміниться, оскільки з його збільшенням збільшується зона проковзування шини по опорній поверхні за рахунок зменшення зони пружної деформації.

Виявлений характер залежності роботи тертя тиску повітря в шині пояснюється зменшенням проковзувань у зонах входу і виходу з контакту. Робота сил тертя суттєво впливає на коефіцієнт опору кочення і тим самим на тягово-швидкісні властивості, зокрема вибіг автомобіля та витрату палива.

Список використаної літератури:

1. Гаспарянц Г.А. Влияние бокового увода колес на износ шин : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Гаспарянц Георгий Ашотович. – МАМИ, 1955. – 153 с.
2. Genta G. Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation / G.Genta // WorldScientificPublishing. – 2003. – № 3. – Рр. 125–163.
3. Tire Addepth Effects on Tire Rolling Resistance / J.R. Luchini, M.M. Motil, W.V. Mars and others // Tire Science and Technology. – 2001. – № 29 (3). – Рр. 134–154.
4. Ребедайло В.М. Работа в п'ятні контакту шини при коченні її з розвалом та сходженням / В.М. Ребедайло, О.Л. Добровольський // Автомобильный транспорт. – 2003. – № 13. – С. 60–63.
5. Поддубный В.И. Механико-математическая модель шины колесного трактора / В.И. Поддубный // Вестник КрасГАУ. Техника. – 2008. – Вып. 1. – С. 222–227.

БУРЕННИКОВ Юрій Юрійович – кандидат економічних наук, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– розробка стратегій та реалізація проектів розвитку автотранспортних підприємств.

Тел.: (0432)59–84–38.

E-mail: burennikov@bk.ru

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ Олександр Леонідович –асистент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання та дослідження експлуатаційних властивостей автотранспортних засобів.

Тел.: (0432)59–84–38.

E-mail: alexdobr_black@ukr.net

СТЕПАНОВ Віктор Володимирович – студент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту
Вінницького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання та дослідження експлуатаційних властивостей автотранспортних засобів.

Тел.: (0432)59–84–38.

E-mail: victor-stepanov@mail.ru

Стаття надійшла до редакції 17.02.2012

Буренников Ю.Ю., Добровольский О.Л., Степанов В.В. Математичне моделювання взаємодії автомобільної шини з опорною поверхнею

Буренников Ю.Ю., Добровольский О.Л., Степанов В.В. Математическое моделирование взаимодействия автомобильные шины с опорной поверхностью

Buryennikov U.U., Dobrovolsky A.L., Stepanov V.V. Mathematical modeling of interaction tires with the supporting surface

УДК 629.113.075.001

Математическое моделирование взаимодействия автомобильные шины с опорной поверхностью / Ю.Ю. Буренников, О.Л. Добровольский, В.В. Степанов

Полученные зависимости позволяют определить работу силы трения в контакте шины с опорной поверхностью. Результаты расчетов представлены графически.

УДК 629.113.075.001

Mathematical modeling of interaction tires with the supporting surface / U.U. Buryennikov, A.L. Dobrovolsky, V.V. Stepanov

The obtained dependences for determining the work force of friction in contact with the tire supporting surface. Calculation results are presented graphically.