

ЩОДО ПИТАННЯ ПРО КУТ ЗАКРУЧУВАННЯ ОДИНАРНОЇ ШИНИ В РЕЖИМІ ГАЛЬМУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Клименко В.І.¹, д.т.н., проф., Капский Д.В.², д.т.н., доц.,
Леонт'єв Д.М.¹, к. т. н., доц., Михалевич М.Г.¹, к.т.н., доц., Куріпка О.В.¹, аспірант,
Фролов А.А.¹, аспірант.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Белорусский национальный технический университет

Анотація. В даній науковій роботі розглянуті особливості закручування пневматичної шини автомобільного колеса з одинарним ошиновуванням в режимі гальмування транспортного засобу на дорогах з низьким та високим коефіцієнтом тертя – ковзання. Виконаний аналіз моделі динамічної зміни кута закручування шини в залежності від ковзання елементів протектора шини в плямі контакту з поверхнею дорожнього покриття, а також отримані результати імітаційного моделювання, які підтверджуються експериментальними дослідженнями. Запропонована емпірична залежність, яка враховує характер зниження величини кута закручування шини на дорогах з високими зчпними властивостями.

Ключові слова: гальмове керування, гальмова система, кут закручування, активна безпека, ковзання транспортного засобу.

Вступ

У разі виникнення обставин, які можуть спричинити дорожньо-транспортну подію (ДТП) водії транспортних засобів застосовують екстрене гальмування, що призводить, як правило до блокування автомобільних коліс та формування на поверхні дорожнього покриття слідової інформації від пневматичних шин. У разі встановлення в гальмовому приводі робочої гальмової системи автомобіля автоматизованих систем регулювання гальмового зусилля слідова інформація від пневматичних шин може бути відсутня або слабо виражена, при цьому ефективність гальмування колісного транспортного засобу буде залежати від кутової деформації шини відносно поверхні дорожнього покриття, яке в свою чергу обмежується зчпними властивостями в плямі контакту «шина-дорожнє покриття».

Аналіз публікацій

З науково технічної літератури [1-5] відомо, що під час гальмування автомобільного колеса з одинарною ошиновкою в плямі контакту шини з поверхнею дорожнього покриття, виникає так зване реалізоване зчеплення f_x (питома гальмова сила), яке може бути визначене з рівняння

$$f_x = \frac{R_x}{R_z} \quad (1)$$

де R_x – гальмова сила, Н;

R_z – нормальна (вертикальна) реакція поверхні дорожнього покриття, Н.

Як показав аналіз наукової літератури [6-10], на величину реалізованого зчеплення впливає багато чинників, які неоднозначно змінюють його [10-13] та ускладнюють імітаційні моделі, що описують характер зміни реалізованого зчеплення від проковзування пневматичної шини відносно поверхні дорожнього покриття.

Аналіз робіт [7-8] показав, що уникнути проблем з впливом різних чинників на реалізоване зчеплення можна, якщо при моделюванні використати так звану «теорію кріпа», яка трансформує рівняння (1) в рівняння (2) шляхом заміни гальмової сили пружними характеристиками пневматичної шини.

$$f_x = \frac{C_x \cdot \xi_x}{R_z \cdot r_d} \quad (2)$$

де ξ_x – кут закручування шини, рад;

C_x – Крутильна жорсткість пневматичної шини, Н·м/рад;

Мета та постановка задачі

Метою роботи є удосконалення методу визначення кута закручування пневматичної

шини одинарного автомобільного колеса в режимі його гальмування шляхом урахування особливостей впливу коефіцієнту тертя-ковзання на дорогах з високими зчіпними властивостями.

Визначення розрахунку пружних характеристик пневматичної шини

При навантаженні на автомобільне колесо, яке належить діапазону $R_z \in [500, 27000]$, як показав аналіз науково технічної літератури [1], можна використати модифіковану залежність C_x у вигляді

$$C_x = \left(0.1 - \frac{B_0}{g \cdot C_x^{p_{\max}}} \cdot e^{-10 \cdot B_1 \cdot p^2} \right) \times (1.5 \cdot R_z - 1.8 \cdot 10^{-5} \cdot R_z^2) \quad (3)$$

де p – тиск у шині, МПа;

$C_x^{p_{\max}}$ – експериментальне значення крутної жорсткості шини при максимально допустимому тиску повітря в шині, Н·м/град.

Коефіцієнти B_0 та B_1 в рівнянні (3) можна визначити з залежностей

$$B_0 = \frac{C_x^{p_{\min}}}{e^{B_1 \cdot p_{\min}}} \quad (4)$$

$$B_1 = \frac{\ln\left(\frac{C_x^{p_{\max}}}{C_x^{p_{\min}}}\right)}{p_{\max} - p_{\min}} \quad (5)$$

де $C_x^{p_{\min}}$ – експериментальне значення крутної жорсткості шини при мінімально допустимому тиску повітря в шині, Н·м/град;

p_{\max} – максимально допустимий тиск повітря в шині, МПа;

p_{\min} – мінімально допустимий тиск повітря в шині, МПа.

Модифікована залежність (3) дозволяє врахувати характер зміни крутної жорсткості пневматичної шини від тиску в ній та вертикальне навантаження на неї. Аналіз результатів моделювання за залежністю (3) показав (рис 3 та 4), що запропонована залежність не суперечить експериментальним дослідженням, які отримано в роботі [3] (рис 5).

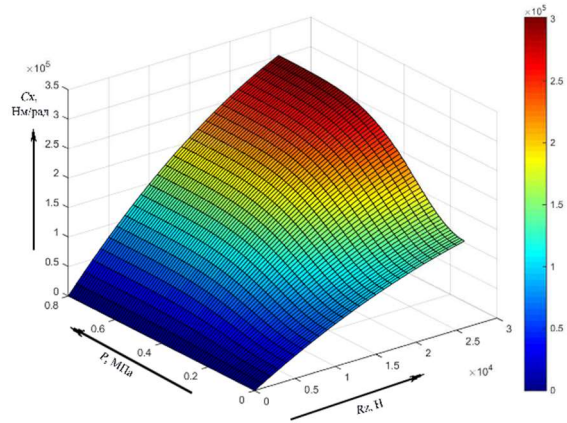


Рис. 3. Результат імітаційного моделювання зміни крутної жорсткості пневматичної шини від вертикального навантаження на шину та тиску в шині

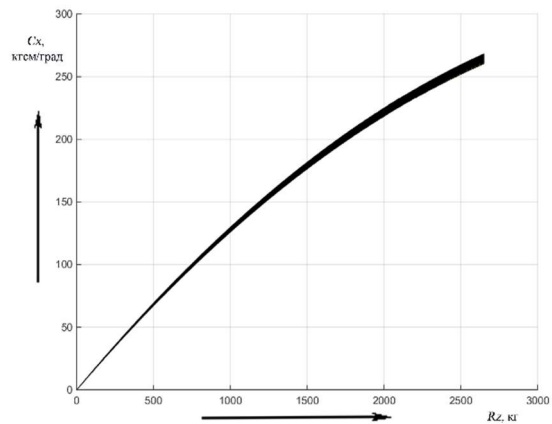


Рис. 4. Результат моделювання зміни крутної жорсткості пневматичної шини 10.00R20 від вертикального навантаження при тиску в шині 0,5-0,8 МПа

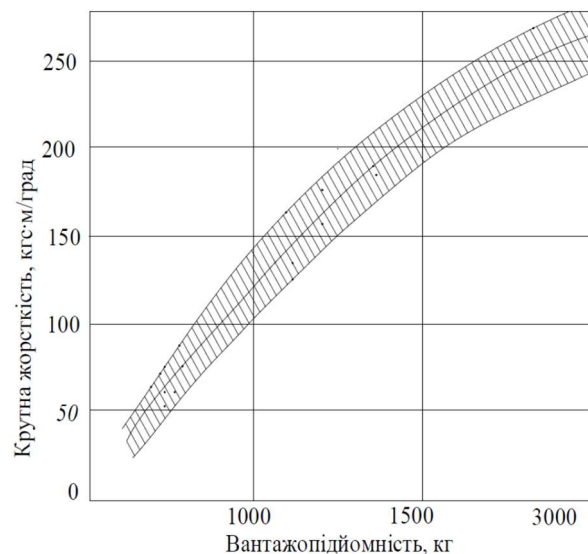


Рис. 5. Результат експериментальних досліджень зміни крутної жорсткості шин різної вантажопідйомності [3]

Що стосується величини кута закручування шини в залежності (2), то аналіз науково технічної літератури [1, 4] показав, що цей кут (ξ_x) відносно різних поверхонь дорожнього покриття може бути описаний залежностями (8) та (9), якщо прийняти лінійну модель (рис 6) деформаційних характеристик пневматичної шини в плямі її контакту з поверхнею дорожнього покриття.

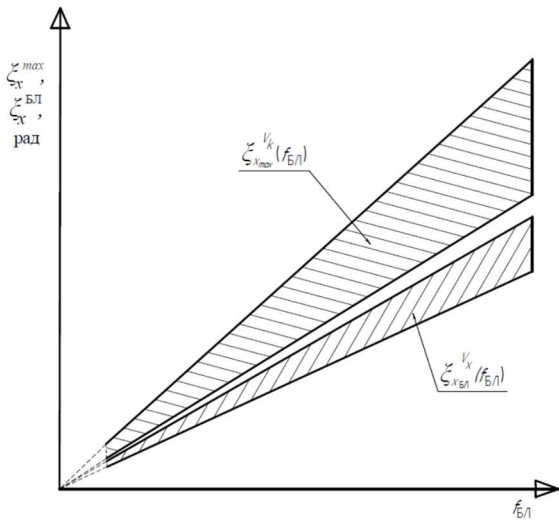


Рис. 6. Модель лінійної зміни кута закручування пневматичної шини в залежності від коефіцієнта тертя-ковзання шини відносно поверхні дорожнього покриття [2]

$$\xi_x^{\max} = f_{\text{БЛ}} \cdot r_{\text{д}} \cdot (4.625 - 4.29 \cdot e^{0.0018 \cdot V_k}) \quad (8)$$

$$\xi_x^{\text{БЛ}} = 0.219 \cdot r_{\text{д}} \cdot f_{\text{БЛ}} \cdot e^{-0.01861 \cdot V_x} \quad (9)$$

де V_k – швидкість автомобільного колеса, м/с;

V_x – швидкість автомобіля, м/с.

$r_{\text{д}}$ – динамічний радіус колеса, м;

У загальному вигляді для опису характеру зміни реалізованого зчеплення в залежності від проковзування шини, в роботі [2] використовується залежність (10), яка з достатньою

точністю [8,9] описує фізичний характер зміни реалізованого зчеплення

$$\xi_x = \frac{a_0^\xi \cdot S}{b_0^\xi + c_0^\xi \cdot S + S^2} \quad (10)$$

Коефіцієнти a_0^ξ , b_0^ξ , c_0^ξ , можна визначити з залежностей (11), (12), (13)

$$b_0^\xi = S_{\text{КР}}^2 \quad (12)$$

$$a_0^\xi = \frac{(\xi_x^{\max} - \xi_0) \cdot (\xi_x^{\text{БЛ}} - \xi_0) \cdot (1 - S_{\text{КР}})^2}{\xi_x^{\max} - \xi_x^{\text{БЛ}}} \quad (11)$$

$$c_0^\xi = \frac{(\xi_x^{\max} - \xi_0) \cdot (1 + S_{\text{КР}}^2) - \rightarrow}{\xi_x^{\max} - \xi_x^{\text{БЛ}}} \rightarrow \frac{-2 \cdot S_{\text{КР}} \cdot (\xi_x^{\text{БЛ}} - \xi_0)}{\xi_x^{\max} - \xi_x^{\text{БЛ}}} \quad (13)$$

Кут закручування пневматичної шини ξ_0 при вільному коченні колеса можна визначити з залежності (14) використовуючи положення «теорії кріпа».

$$\xi_0 = \frac{R_{f_r} \cdot r_{\text{д}}}{C_x} \quad (14)$$

де R_{f_r} – сила опору кочення автомобільного колеса, Н.

На основі аналізу експериментальних даних наведених в роботах [4, 5] щодо впливу вертикального навантаження на характеристику пневматичної шини, за допомогою залежності (14), визначимо кут закручування пневматичної шини ξ_0 , при вільному коченні автомобільного колеса [7] за умови різного вертикального навантаження на шину. Результати розрахунків, для зручності аналізу, зведемо до таблиці 1.

Таблиця 1. Аналіз експериментальних досліджень [1,4,5] пневматичної шини вантажного автомобіля

10-R20 F					
R_z	C_x	$r_{\text{д}}$	ξ_0	$\xi_x^{\text{БЛ}}$	ξ_x^{\max}
40900	297080	0.49	0.0012	0.035	0.053
24800	248490		0.0008	0.029	0.042
9450	119520		0.0006	0.025	0.04

Аналізуючи структуру залежності (14) видно, що кут закручування пневматичної шини при вільному коченні автомобільного колеса прямо пропорційний силі опору коченню R_{fr}

Аналогічним чином враховуючи гальмову силу, яку можна отримати з експериментальних даних (рис. 7) наведених у роботі [5] можна визначити максимальний кут закручування пневматичної шини та кут закручування шини заблокованого колеса з відповідного рівняння (15) та (16).

$$\xi_{\max} = \frac{R_x^{\max} \cdot r_d}{C_x} \quad (15)$$

$$\xi_{\text{БЛ}} = \frac{R_x^{\text{БЛ}} \cdot r_d}{C_x} \quad (16)$$

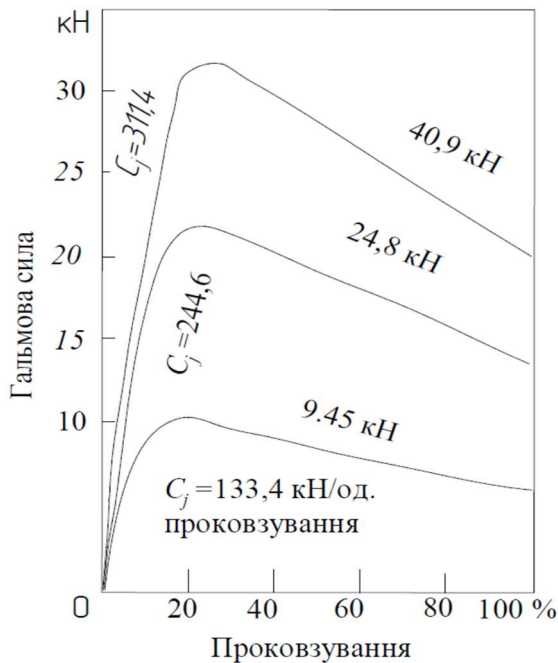


Рис. 7. Вплив вертикального навантаження на характеристику гальмування пневматичної шини 10-20 F на сухому асфальтовому покритті [5]

Враховуючи міркування авторів роботи [1], щодо нелінійного закручування пневматичної шини (рис 8) модифікуємо залежності (8) та (9) шляхом введення додаткових коефіцієнтів, що відповідають результатам експериментальних досліджень зображених на рисунку 7.

Модифіковані залежності (17) та (18) враховують більш інтенсивнішу зміну кута закручування шини відносно поверхні дорож-

нього покриття при високих коефіцієнтах тертя – ковзання

$$\xi_{\text{БЛ}}^x = \left(0.116 \cdot r_d \cdot f_{\text{БЛ}} \cdot e^{(-0.05233 \cdot V_a \cdot f_{\text{БЛ}})} \right) \quad (17)$$

$$\xi_{\text{БЛ}}^{\max} = f_{\text{БЛ}} \cdot r_d \cdot \left(2.312 - 2.14 \cdot e^{(0.00216 \cdot V_a \cdot f_{\text{БЛ}})} \right) \quad (18)$$

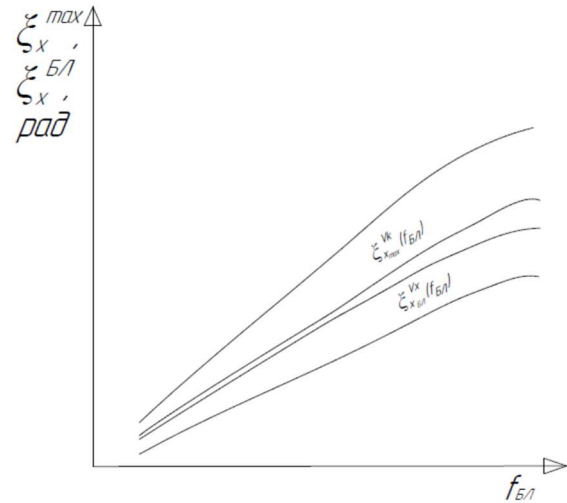


Рис. 8. Характеристика нелінійного закручування пневматичної шини у режимі гальмування КТЗ [1]

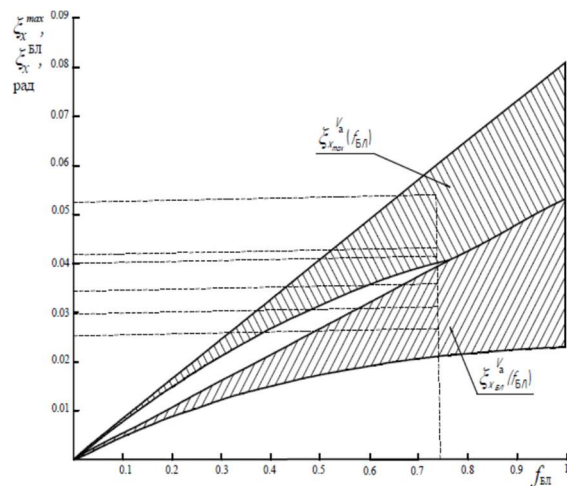


Рис. 9. Характеристика нелінійного закручування одинарної пневматичної шини (у режимі гальмування) в залежності від коефіцієнту тертя

Аналіз отриманих результатів моделювання характеру зміни кута закручування шини відносно поверхні дорожнього пок-

риття (рис 9) показав, що запропоновані залежності уточнюють положення теорії кріпа та підтверджують нелінійний зв'язок між кутом закручування шини та поверхнею дорожнього покриття [1, 4]

Висновки

Отримані результати імітаційного моделювання за запропонованою залежністю (3) визначають, що найвищих показників крутильної жорсткості пневматична шина досягає при тиску в шині 0.8 МПа та при вертикальному навантаженні на неї близько $2,6 \cdot 10^4$ Н.

На основі проведеного аналізу були запропоновані модифіковані залежності (17), (18), які уточнюють характер зміни кута закручування шини відносно поверхні дорожнього покриття при високих коефіцієнтах тертя-ковзання на 20%.

Література

1. Реализация интеллектуальных функций в электронно – пневматичном тормозном управлении транспортных средств: монография / А. Н. Туренко, В. И. Клименко, В. А. Богомолов, Л. А. Рижих, Д. Н. Леонтьев, О. М. Красюк, Н. Г. Михалевич. – Х. : ХНАДУ, 2-е издание, дополнено, 2015. –450 с
2. Левин М.А., Фуфаев Н.А. Теория качения деформируемого колеса. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат.лит., 1989. – 272 с. –ISBN 5 – 02 – 014010 – 4
3. Работа автомобильной шины. Под ред. В. И. Кнороза. М., «Транспорт», 1976. 238 с. Авт.: В. И. Кнороз , Е. В. Кленников ,И. П.Петров , А. С. Шелухин , Ю. М. Юрьев.
4. Определение продольной реализуемой силы сцепления автомобильного колеса с опорной поверхностью по крутильной деформации и ее жесткости / Л.А. Рыжих, Д.Н. Леонтьев, А.В. Быкадоров // Автомобильная промышленность. – Россия, 2014, № 10 – С. 20-24
5. Вонг. Дж. Теория наземных транспортных средств: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с., ил.
6. Характеристики широкопрофильной автомобильной шины на крупных неровностях / А.Б. Фоминых, Л.Ф. Жеглов // Наука и образование МГТУ им Н.Э. Баумана. Электронный журнал, 2015. № 11. С. 1 – 11.
7. Анализ методов определения коэффициента сопротивления качению колес автомобиля / В.И. Клименко, С.Н. Шуклинов, Д.Н. Леонтьев и др. // Автомобильный транспорт. – Украина, 2020, №46 – С. 33 – 39
8. Об использовании сил сцепления колес транспортного средства, оборудованного автоматизированной системой регулирования тормозного усилия / Д.Н. Леонтьев, И.Н.

- Никитченко, Л.А. Рыжих и др. // Наука и Техника. – Беларусь, 2019, № 5 – С. 401 – 408
9. Вплив вертикального навантаження на гальмівну силу та коефіцієнт зчеплення шини автомобільного колеса / Д.М. Леонтьєв, М.Г. Михалевич, А.А. Фролов// Теорія та практика судової експертизи і криміналістики. – Україна, 2018, № 18 – С. 383 – 392
 10. Pacejka, H.B., Besselink, I.J.M. Magic Formula Tyre Model with Transient Properties.– Lisse: Swets & Zeitlinger B.V., 1997. – P. 234 – 249.
 11. Burekhardt M. Erfahrungen bei der Konzeption und Entwicklung des Mercedes-Benz / Bosch – Anti-Blockier-Systems (ABS) // Automobiltechnische Zeitschrift.– 1979.– Bd. 81.– Vol. 5.– P. 201–208.
 12. Mark Denny The dynamics of antilock brake systems / Mark Denny // European Journal of Physics. – 2005. – Vol.26, №6. P. 1007 1016.
 13. Методи розрахунку коефіцієнту зчеплення, що реалізується при коченні колеса в гальмівному режимі / [Д.М. Леонтьєв, Л.О. Рижих, О.В. Бикадоров и др.] //– Автомобільний транспорт: науковий журнал., 2010. – Вип. №27. – С.7-12.

References

1. Turenko A. N., Mikhalyevych N. G., Leontiev D. N. (2015) Implementation of Intelligence Functions in Electronic-pneumatic Brake Control of Vehicles. Kharkov, KhNADU Publ. 450 (in Russian) Teoriya
2. Levin, M.A., Fufaev, N.A.: Teoriya kacheniya defor-mirovannogo kola [The theory of rolling deformed wheels]. Nauka, Moscow (1989)
3. Knoroz V.I. E.V. Klennikov, I.P. Petrov, Sheluhin A.S., U.M. Yrev Rabota avtomobilnoy shinu [Car tire operation] Transport Moscow (1976)
4. Ryzhykh L.A., Leontiev D.N., Bykadorov A.V. Determination Longitudinal Tire using twist angle and stiffness properties of the tire (2014). Avtomobil'naya Promyshlennost' [Automotive Industry], (10), 20-24 (In Russian)
5. Wong J.Y. Theory of ground vehicles. – 3rd ed/J.Y. Wong // Carleton University Ottawa. John Wiley and Sons, Inc., 2001.528p.
6. Fominyh A.B., Jeglov L.F., Wide – section Tire Features on Large Bumps (2015) Science and Education of the Bauman MSTU (11), 1-11p
7. Klimenko V.I., Shuklinov S.N., Leontiev D.N., Analiz metodov opredeleniya roeficienta soprotivleniya kacheniu koles avtomobila [Analysis of methods for determining the coefficient of rolling resistance of car wheels] Automobile transport (2020) 33 – 39p
8. Leontiev D.N., Nikitchenko I.N., Ryzhyh L.A., Kuripka O.V. About Applicdction the Tyre – Road Adhesion Determination of a Vehicle Equipped withan Automated System of Brake Proportioning Science and Technique V.18, No 5 (2019)
9. Leontiev D.N., Michalevich N.G., Frolov A.A., Influence of Vertical load on Braking force tyre

- adhesion coefficient of vehicle wheel (2018) Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics No 18, 383-392p
10. Pacejka, H.B., Besselink, I.J.M. Magic Formula Tyre Model with Transient Properties.– Lisse: Swets & Zeitlinger B.V., 1997. – P. 234 – 249.
 11. Burckhardt M. Erfahrungen bei der Konzeption und Entwicklung des Mercedes-Benz / Bosch – Anti-Blockier-Systeme (ABS) // Automobiltechnische Zeitschrift.– 1979.– Bd. 81.– Vol. 5.– P. 201–208.
 12. Mark Denny The dynamics of antilock brake systems / Mark Denny // European Journal of Physics. – 2005. – Vol.26, №6.P. 1007 1016.
 13. Ryzhykh L.A., Leontiev D.N., Bykadorov A.V Methods for calculating the coefficient of adhesion, which is realized when rolling the wheel in the brake mode Automobile transport (2010) No 27 7 – 12p

Клименко Валерій Іванович¹, д.т.н., проф., каф. Автомобілів ім. А.Б. Гредескула, valeriy.klimenko@gmail.com, тел. +38050-845-65-29 orcid:0000-0002-7399-0397

Капский Денис Васильевич², д.т.н., доц., каф. Автотракторного факультета, d.kapsky@gmail.com, тел. +375296865323, orcid: 0000-0001-9300-3857

Леонтъев Дмитро Миколайович¹, к.т.н., доц. каф. Автомобілів ім. А.Б. Гредескула, dima.a3alij@gmail.com, тел. +38 095-903-68-88, orcid: 0000-0003-4255-6317

Михалевич Микола Григорович¹, к.т.н., доц., каф. Автомобілів ім. А.Б. Гредескула, mkolyag@gmail.com, тел. +380503431827 orcid:0000-0001-9890-3838

Куріпка Олександр Володимирович¹, аспірант каф. Автомобілів ім. А.Б. Гредескула, kuripkas199721@gmail.com, тел. +38 050-845-65-29, , orcid: 0000-0002-0550-7201

Фролов Андрій Анатолійович¹, аспірант каф. Автомобілів ім. А.Б. Гредескула, andrey5120@mail.ru, тел. +380988262198, orcid: 0000-0002-3868-4511

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

²Белорусский национальный технический университет, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65.

On The Question of Twisting of a Single Tire in Vehicle Braking Modes

Abstract. Problem. *In the event of circumstances that may cause a traffic accident (accident), drivers apply emergency braking, which usually leads to the blocking of car wheels and the formation on the road surface of track information from pneumatic tires. If automated brake force control systems are installed in the brake actuator of the vehicle, the tracking information from the pneumatic tires may be absent or*

weak, and the braking efficiency of the wheeled vehicle will depend on the angular deformation of the tire relative to the road surface, which in turn is limited. coupling properties in the contact spot "tire-road surface". **Goal.** *The aim of the work is to improve the method of determining the angle of twist of the pneumatic tire of a single car wheel in the mode of its braking by taking into account the effects of the coefficient of friction-sliding on roads with high traction.* **Methodology** *the peculiarities of twisting the pneumatic tire of a car wheel with a single busbar in the mode of vehicle braking on roads with low and high coefficient of friction - sliding are considered. The analysis of the model of dynamic change of the tire twist angle depending on the sliding of the tire tread elements in the spot of contact with the road surface is performed, and the results of simulation modeling are obtained, which are confirmed by experimental experiments.* **Originality.** *An empirical dependence is proposed, which takes into account the nature of the decrease in the value of the angle of twist of the tire on roads with high traction properties.* **Practical value.** *The obtained results of simulation modeling according to the proposed dependence determine that the highest indicators of torsional rigidity of the pneumatic tire are reached at a tire pressure of 0.8 MPa and a vertical load on it of about $2.6 \cdot 10^4$ N.*

Key words: *Brake control, brake system, twisting angle, active safety, vehicle slip.*

Klimenko Valeriy¹, professor, Doct of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles named after A.B. Gredeskul, valeriy.klimenko@gmail.com, Tel. +38050-845-65-29 orcid:0000-0002-7399-0397

Kapski Denis², Candidate of Technical Sciences, Automotive and Tractor Faculty d.kapsky@gmail.com, Tel. +375296865323, orcid: 0000-0001-9300-3857

Leontiev Dmytro¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles named after A.B. Gredeskul, dima.a3alij@gmail.com, Tel.+38 066-777-77-77, orcid: 0000-0001-6098-8661

Mikhalevich Nikolay¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles named after A.B. Gredeskul, mkolyag@gmail.com, Tel. +380503431827 orcid:0000-0001-9890-3838

Kuripka Oleksandr¹, PhD., student, Tel.: +38 050-845-65-29, kuripkas199721@gmail.com, orcid: 0000-0002-0550-7201

Frolov Andrii¹, PhD., student, Tel.:+380988262198, andrey5120@mail.ru, orcid: 0000-0002-3868-4511

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Belarusian National Tehnical University, 65, Nezavisimosty str, Minsk, 61002, Belarus