

© Б. С. Завертанний, докт. філософії,
інженер-конструктор,
ORCID: 0009-0001-7492-3663,
e-mail: zavertannyi@stu.cn.ua
(ТОВ «ПЕТ ТЕХНОЛОДЖИЗ»);
© Г. В. Пасов, канд. техн. наук, доцент кафедри,
ORCID: 0000-0001-7248-9085,
e-mail: genapasov@gmail.com
(Національний університет
«Чернігівська політехніка»);
© М. С. Завертанний, канд. техн. наук,
науковий співробітник,
ORCID: 0000-0002-8415-8555,
e-mail: zavertannyi@gmail.com
(Інститут електрозварювання
імені Є. О. Патона НАН України)

© Bohdan Zaveretannyi,
Doctor of Philosophy, Design Engineer,
ORCID: 0009-0001-7492-3663,
e-mail: zavertannyi@stu.cn.ua
(LTD PET TECHNOLOGIES);
© Hennadii Pasov, Candidate of Technical
Science, Associate Professor,
ORCID: 0000-0001-7248-9085,
e-mail: genapasov@gmail.com
(Chernihiv Polytechnic National University)
© Myroslav Zaveretannyi,
Candidate of Technical Science, Researcher,
ORCID: 0000-0002-8415-8555,
e-mail: zavertannyi@gmail.com
(E.O. Paton Electric Welding Institute)

ГЕОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОКОВЗУВАННЯ ШИН АВТОМОБІЛЯ ПО ДОРОЖНЬОМУ ПОЛОТНУ ПРИ НЕОПТИМАЛЬНОМУ РОЗВАЛІ (КУТІ УСТАНОВКИ КОЛІС)

GEOMETRIC ANALYSIS OF CAR TIRE SLIPPAGE ON THE ROAD SURFACE WITH NON-OPTIMAL CAMBER (WHEEL MOUNTING ANGLE)

Анотація. Тертя поверхні шин авто по дорожньому покриттю є одним із найбільших чинників дисипації енергії під час руху авто та нагріву автомобільної шини. Насамперед від тертя залежать втрата потужності, термін експлуатації та ресурс самої шини. Зрозуміло, чим більше кут установки коліс, тим більш нерівномірно та інтенсивно буде стиратися шина. Також від кута установки колеса може залежати пляма контакту шини авто з дорожнім покриттям, що зі свого боку впливає на параметри гальмування автомобіля, такі як уповільнення та пройдений шлях після початку гальмування. Особливо важливими є оцінка експлуатації шини в усталених режимах та на великих пробігах. У роботі проведено аналіз впливу кута розвалу автомобільного колеса на швидкість тертя по лінії контакту шини колеса з дорожнім покриттям. Описано принцип проковзування поверхні шини колеса відносно дорожнього покриття. Наведено причини виникнення відносного проковзування шини колеса по дорожньому покриттю. Приведено схеми розподілення швидкостей, проковзування і сил тертя по довжині лінії взаємодії шини колеса з дорожнім покриттям.

Ключові слова: розвал, сходження, кут установки колеса, шина, проковзування, тертя.

Abstract. Today, it is hard to imagine modern society without automobile transport. Automobile transport is actively used in everyday life, in industry and in other areas, its number is also actively increasing. There is mass motorization of the population. During the movement of the car, there is a dynamic change in the angle of convergence of the wheels, which is caused by the structural features of the suspension system and the car control system. Due to the fact that reducing the energy consumption of equipment and road transport as a separate component of technological processes is a very relevant issue today, there is a need to reduce useful energy losses during the operation of automobile transport. Also, to the above, we can add the effect of losses of useful energy on wear and tear in contact pairs of road transport and road surfaces on which the latter moves. **Goal.** The purpose of the work is to investigate the influence of geometric friction of the wheel tire sliding on the road surface in the presence of a camber angle in line with the rolling friction, to conduct an analysis of wheel tire slippage relative to the rolling pole. **Methodology.** In order to achieve the given task, it is necessary to reveal the essence of the concept of slippage, its effect on the linear speeds of discrete sections of the tire, and to determine the changes in slippage characteristics depending on the wheel camber angle. **Originality.** The effect of the geometrical friction of the wheel tire sliding on the road surface was studied taking into account the camber angle along with the rolling friction, an analysis of the wheel tire sliding on the road surface relative to the rolling pole was carried out. The essence of the concept of skidding, tires on the road surface, its influence on the linear speeds of discrete sections of the tire is revealed. **Conclusions.** A geometric analysis of the influence of tire slippage of a car wheel on the road surface in the presence of a tire camber angle was carried out. The essence of the geometric friction of the wheel tire sliding on the road surface in the presence of a camber angle along with rolling friction is revealed. The principle of sliding of the upper tire of the wheel relative to the road surface is described.

Keywords climb camber, wheel installation angle, tires, slipping, friction.

Вступ

Сучасне суспільство важко уявити без автомобільного транспорту. У повсякденному житті, у промисловості та інших сферах він активно використовується, а також активно зростає його кількість. Відбувається масова автомобілізація населення. З плином часу та збільшенням кількості моделей транспорту відбувається і його технічне вдосконалення, впровадження нових технологій та конструкцій. Велику роль у вдосконаленні транспорту відіграє ціль забезпечення паливної економічності. Важливе значення в енергозатратах має вплив контакту шини та дорожнього полотна, адже саме в результаті контакту коліс і дорожнього полотна відбувається рух автомобіля. Вищевказане приводить до висновку, що процес взаємодії дорожнього полотна та шини автомобіля суттєво впливає на довговічність шин та паливну економічність. На ці показники великий вплив мають кути установки коліс.

У процесі руху автомобіля відбувається динамічна зміна кута сходження коліс, що спричинено конструктивними особливостями системи підвіски та системи керування автомобілем.

Через те, що на сьогодні дуже актуальним питанням є зниження енергозатрат обладнання та автомобільного транспорту як окремої складової технологічних процесів, виникає потреба у зменшенні втрат корисної енергії у процесі експлуатації автомобільного транспорту. Також до вищевказаного можна додати вплив втрат корисної енергії на знос у парах контакту автомобільного транспорту та дорожніх покриттів, по яких пересувається останній.

Аналіз публікацій. Сучасні автомобілі – це не просто засоби пересування окремих людей та перевезення різних груп вантажів. Це складні механічні системи для виконання завдань з підтримки та розвитку економіки країн, з'єднання окремих регіонів та навіть континентів. Але водночас це доволі енергоємні механізми, для приведення в рух яких хімічна або електрична енергія перетворюється в механічну. Та досить часто не вся енергія, надана автомобілю, спрямована на виконання корисної роботи. Дуже часто енергія просто розсіюється під час контакту колеса автомобіля з дорожнім покриттям [1–6].

У роботах [1,3-5] розглянуто вплив кута

установки коліс на витрату палива двигуном автомобіля. Проведене порівняння впливу як відхилення кута установки коліс назовні від кузова автомобіля, так і всередину.

У роботах [2, 6, 7] проаналізований вплив кута установки коліс на керованість автомобіля та вказана можливість зміни кутів установки коліс автомобіля на перехідних режимах руху. Описуються методи підвищення продуктивності колісних машин зміною передавальних відношень від органу управління до коліс. Однак автори не розглядають впливу проковзування шин авто по дорожньому полотну в умовах зміни кута установки коліс на енергозатрати. Також у вищевказаних роботах не розглянуто впливу зміщення полюса кочення на геометричне проковзування шин авто відносно дорожнього полотна.

У циклі робіт [8-10] проведено оцінювання опору коченню шини під час початку руху авто, а також – дослідження нагріву шин та підвищення тиску в шині. Також розглядається опір шини автомобіля коченню під час старту авто. Але проводиться моделювання методом скінчених елементів за допомогою прикладних програм, що потребує математичного описання та проведення моделювання тертя і проковзування шин автомобіля по дорожньому полотну в умовах зміни кута установки коліс та дослідження дисипації енергії.

Мета і постановка завдання. Беручи до уваги вищенаведений аналіз джерел інформації, які пов'язані з питанням кута установки коліс, а також їхнього впливу на експлуатацію автомобільного транспорту, витрати палива та стійкість авто на дорожньому полотні, можна зробити висновок, що на сьогодні вплив кута сходження коліс на проковзування шини по дорожньому полотну вивчено недостатньо. Великої складності цим дослідженням додає відсутність обладнання для проведення випробувань на дорожніх полотнах, яке дало б змогу розглядати вплив кута установки коліс на їхнє проковзування по дорожньому полотну під час руху автомобіля. Динамічна зміна положення коліс відносно дорожнього полотна, що відбувається через перемінну динаміку руху автомобіля та не ідеальність дорожнього полотна можуть призводити до зміни кута сходження коліс при реальній експлуатації транспорту. Але попри динаміку руху можна вважати кут установки

коліс статичним значенням для узагальнення значень отриманого проковзування.

Метою роботи є дослідження впливу геометричного тертя ковзання шини колеса по дорожньому полотну за наявності кута розвалу поряд із тертям кочення, проведення аналізу проковзування шини колеса відносно полюсу кочення.

Для досягнення поставленої задачі необхідно розкрити сутність поняття проковзування, його вплив на лінійні швидкості дискретних ділянок шини та визначити зміни характеристик проковзування від кута розвалу колеса.

Основна частина

Аналіз рівноваги сил тертя між шиною та дорожнім покриттям

Надійний контакт шини з дорожнім покриттям обумовлений кількома факторами, які прямо впливають на характер та величину проковзування шини по поверхні дорожнього покриття, до яких входять:

1. Умова, що забезпечує постійне фрикційне з'єднання шини з дорожнім покриттям, яка визначається рівновагою сили тертя [11]. У розглянутому випадку це чисте тертя кочення, у місці контакту (полюсі кочення), та тертя кочення із проковзуванням (із тертям ковзання) у інших точках взаємодії шини з дорожнім покриттям:

$$F_t = F_p \cdot f = F_o \cdot \beta. \quad (1)$$

де: F_t – сила тертя, Н;

F_p – сила притискання шини до дорожнього полотна, Н;

f – коефіцієнт тертя матеріалів шини та дорожнього полотна;

F_o – обертове зусилля, Н;

β – коефіцієнт запасу зчеплення (вибирається з таким розрахунком, щоб в усіх можливих режимах роботи шини автомобіля не мала можливості проковзувати (пробуксовувати) по дорожньому полотну).

2. Умова збереження стабільної роботи за зміни швидкісних режимів. Для зниження витрат енергії на тертя при різних режимах роботи автомобіля та зменшення напруженості роботи контактної пари шина – дорожнє покриття, необхідно щоб відповідне співвідношення величини сили притискання F_p та F_t були постійними [11]:

$$F_p/F_t = const. \quad (2)$$

3. Також до факторів, що мають вплив на проковзування, доцільно віднести як геометричні так і масо-інерційні параметри шини та колеса з приводом загалом.

4. Фактор можливості руху на мокрих поверхнях. Процес руху автомобіля може здійснюватися як по мокрому дорожньому полотну, так і по сухому [12]. У першому випадку коефіцієнт тертя менший, ніж у другому ($f_1 < f_2$), тому для збереження фрикційного контакту шини з дорожнім покриттям необхідно збільшити зусилля притискання шини $F_{p1} = F_{p2} \frac{f_2}{f_1}$, що є майже неможливим без зміни ваги автомобіля або ширини шини.

6. Фактор геометричного проковзування шини по дорожньому полотну, який виникає через неоднакову зміну лінійної швидкості по довжині контакту шини автомобіля та дорожнього полотна і залежить від геометричних та конструктивних параметрів шини, тиску в шині та підвіски автомобіля.

Вказані умови роботи пари шина автомобіля – дорожнє покриття повинні враховуватися як у виборі матеріалу шини автомобіля і поверхні дорожнього полотна, так і в процесі розрахунку та конструювання підвіски і рульового керування автомобіля. Особливу увагу необхідно приділяти максимальному зменшенню величини ковзання, що можливо досягти за рахунок визначення раціональних кутів установки коліс.

Аналіз проковзування шин авто по дорожньому полотну

Одним з основних факторів, що має суттєвий вплив на роботу фрикційної пари шина – дорожнє покриття є геометричне ковзання. Геометричне ковзання спонукає до нерівномірного проковзування шини з наявним кутом установки колеса по рівному дорожньому полотну, що призводить до нерівномірного зносу шини по всій довжині. Розглянемо шляхи, що дозволять зменшити величину геометричного проковзування. Для проведення аналізу проковзування, як базову теорію, застосуємо та адаптуємо алгоритм розрахунку проковзування [13]. Роботу кінематичної пари шина – дорожнє покриття з прямолінійними твірними і лінійним контактом можна розглядати в загальному випадку як кочення конуса (шина) по поверхні циліндра (дорожнє

покриття) з незбіжними вершинами, де: O - вершина конуса, O' - вершина циліндра, яка знаходиться на безкінечній відстані від полюса кочення P (рис. 1). Роботу кінематичної пари шина – дорожнє покриття можна представити епюрами розподілу швидкостей ковзання v_k та сил тертя F_f по довжині лінії контакту (рис. 1).

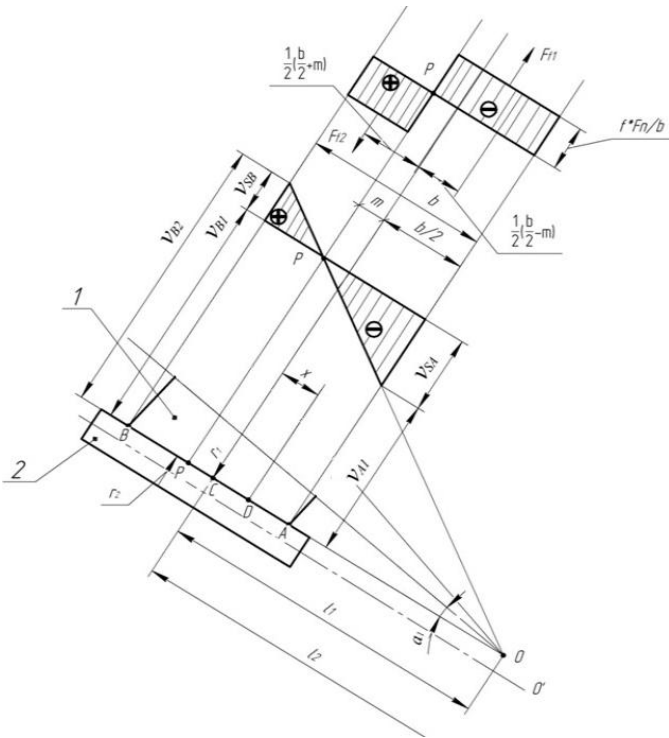


Рис. 1. Схема розподілення лінійних швидкостей, проковзування і сил тертя по довжині лінії контакту шини колеса з дорожнім покриттям: 1 – шина колеса; 2 – дорожнє покриття.

Під час кочення шини по дорожньому полотну швидкість по довжині лінії контакту AB змінюється не рівномірно $v_{A1} < v_{B1}$ відповідно в точках A та B . На дорожньому полотні – швидкість у цих самих точках має однакове значення і дорівнює швидкості в полюсі кочення P – $v_{A2} = v_{B2} = v$. В полюс кочення P лінії контакту AB має місце чисте кочення, у всіх інших точках – кочення відбувається з проковзуванням зі швидкостями відповідно v_{SA} та v_{SB} , на ділянці PA ковзання відбувається з від’ємним знаком, а на ділянці PB з додатнім.

При повній відсутності навантажень полюс кочення P лежить посередині лінії контакту AB , а моменти сил тертя M_{f1} і M_{f2} між поверхнями дорожнього полотна та шини, що виникають відповідно, на ділянках PA і PB зрівноважені.

При навантаженні пари контакту полюс кочення P зміщується. При цьому сила тертя F_{f1} , що виникає на ділянці PA , відіграє негативну роль - гальмує шину відносно дорожнього полотна, а сила тертя F_{f2} , що виникає на ділянці PB , навпаки, розганяє її. Приймавши початок координат в посередині контактної лінії AB в точці C ($AC=CB$). Координату x до вершини шини т. O вважаємо позитивною. Координату t яка визначає положення полюса кочення т. P вводимо в усі залежності також зі своїм знаком: «мінус» при зміщенні від середини до основи конуса шини і «плюс» при зміщенні полюса кочення P до вершини т. O .

Різницю моментів сил тертя M_{f1} і M_{f2} , які виникають від сил тертя F_{f1} і F_{f2} зрівноважує момент опору M_r на дорожньому полотні [14]. Під M_r розуміють повний момент опору на дорожньому полотні, зокрема корисний опір, а також тертя кочення шини по дорожньому полотну.

$$M_r = F_{f1} \cdot \left(r_2 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b}{2} + m \right) \cdot \sin(\alpha_2) \right) - F_{f2} \cdot \left(r_2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b}{2} - m \right) \cdot \sin(\alpha_2) \right). \quad (3)$$

$$F_{f1} = q_n \cdot f \cdot \left(\frac{b}{2} - m \right);$$

$$F_{f2} = q_n \cdot f \cdot \left(\frac{b}{2} + m \right);$$

$$r_2 = l_2 \cdot \sin(\alpha_2) = const;$$

$$l_2 = \infty; q_n = \frac{F_n}{b}.$$

де:

q_n – нормально розподілене навантаження, Н/м;

α_2 – кут нахилу твірної дорожнього полотна ($\alpha_2=0$), рад;

l_2 – відстань від полюса кочення P до вершини дорожнього полотна т. O' ($l_2 = \infty$);

b – довжина лінії контакту AB шини з дорожнім покриттям, м.

Після підстановки і перетворень в загальному вигляді:

$$M_r = -q_n \cdot f \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \left(m^2 - 2 \cdot m \cdot l_2 - \frac{b^2}{4} \right). \quad (4)$$

Оскільки дорожнє покриття плоске та нерухоме, то момент опору M_r може бути прийнятий рівним нулю $M_r = 0$.

Аналогічно до попереднього різниця моментів сил тертя M_{f1} і M_{f2} відносно ведучого валу шини дає момент на пакуванні:

$$M = -q_n \cdot f \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \left(m^2 - 2 \cdot m \cdot l_1 - \frac{b^2}{4} \right). \quad (5)$$

де:

l_1 – відстань від полюса кочення т. Р до вершини конуса шини т. О, м;

α_1 – кут нахилу твірної шини, рад.

Координати полюса кочення з урахуванням моменту на шині та потужності тертя при геометричному ковзанні визначаємо з наступного виразу (5):

$$m = l_1 - \sqrt{l_1^2 + \frac{b^2}{4} - \frac{M^2}{q_n \cdot f \cdot \sin(\alpha_1)}}. \quad (6)$$

Далі вважаємо, що обертова сила F_t прикладена в полюсі кочення, тоді момент опору:

$$M = -F_t \cdot (r_1 - m \cdot \sin(\alpha_1)) = -F_t \cdot (l_1 - m) \cdot \sin(\alpha_1). \quad (7)$$

Прирівнюючи (7) до (4) і враховуючи, що:

$$F_t = \frac{F_n \cdot f}{\beta} = \frac{q_n \cdot b \cdot f}{\beta}. \quad (8)$$

Отримаємо:

$$m = \left[1 + \frac{1}{\beta} \cdot \frac{b}{2 \cdot l_1} - \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2 \cdot l_1} \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta^2} \right)} \right] \cdot l_1. \quad (9)$$

З метою зменшення ковзання відношення b/l_1 беруть якомога меншим [15] тому членами з співмножником $(b/2l_1)^2$ у формулі (9) можна знехтувати. Тоді з необхідною точністю можна вказати:

$$m \approx \frac{F_t}{F_n \cdot f}, \quad m \approx \frac{1}{\beta} \cdot \frac{b}{2} \quad (10)$$

Миттєве значення передаточного відношення пари дорожнє покриття – шина визначається виразом [14]:

$$i(m) = \frac{r_1 - m \cdot \sin(\alpha_1)}{r_2} = \frac{\sin(\alpha_1) \cdot (l_1 - m)}{r_2}. \quad (11)$$

У парі контакту шини з дорожнім покриттям при постійній обертовій силі $F_t = \text{const}$, полюс кочення т. Р зміщується залежно від швидкості руху авто та нерівності поверхні дорожнього полотна та сили притискання шини вздовж лінії контакту AB (від дії динамічних складових). Для крайового випадку, коли $F_t = F_p \cdot f$ і $\beta = 1$, координата полюса $m \approx 0,5b$, тобто полюс т. Р кочення співпадає з т. В, швидкість геометричного проковзування v_s досягає максимального значення. За умови подальшого зменшення зусилля притискання $F_t > F_n \cdot f$ та коефіцієнту зчеплення $\beta < 1$ буде відбуватися повне проковзування шини по дорожньому полотну – буксування.

Однією з найбільш важливих характеристик процесу є відносна швидкість проковзування ε_x шини по дорожньому полотну.

Швидкість відносного проковзування v_s в довільній точці D з координатою x (Рис.1) визначається різницею швидкостей дорожнього полотна і шини v_1 і v_2 :

$$v_s = v_1 - v_2 = -\frac{(l_2 - l_1) \cdot (x - m)}{(l_2 - m) \cdot (l_1 - m)} v \quad (12)$$

Відносна швидкість геометричного проковзування шини по дорожньому полотну в загальному випадку:

$$n_x = \frac{v_s}{v} = -\frac{(l_2 - l_1) \cdot (x - m)}{(l_2 - m) \cdot (l_1 - m)}. \quad (13)$$

Враховавши у виразі (13), що $l_2 = \infty$, можна прийняти $l_2 - m \approx l_2 - l_1$, тоді вираз геометричного проковзування набуває вигляду:

$$n_x = -\frac{x-m}{l_1-m}. \quad (14)$$

Повного усунення геометричного проковзування можна досягнути за умови $\alpha_1=0$. Це можливо за умови ідеального дотримання кута встановлення колеса і відсутності податливості підвіски (її абсолютної жорсткості).

За допомогою отриманих залежностей можна визначати епюри зносу шин по дорожньому покриттю та використовувати їх у подальших дослідженнях втрат енергії на тертя проковзування в парі шина – дорожнє покриття, та їхній вплив на паливну ефективність автомобіля.

Висновки

На сьогодні кут установки коліс, тобто кут нахилу коліс відносно площини дорожнього полотна, має суттєве значення для визначення найбільш характерних умов зносу шини колеса та розсіювання енергії під час експлуатації. Також варто вказати, що кут установки коліс впливає на режими та витрати палива під час руху автомобіля. Виходячи з наведеного, дослідження впливу кута установки коліс є важливою та невід'ємною частиною розвитку як сучасного автомобілебудування, так і трибології.

Проведено геометричний аналіз впливу проковзування шин автомобільного колеса по дорожньому полотну у разі наявності кута розвалу шин.

Розкриті сутність геометричного тертя ковзання шини колеса по дорожньому полотну за наявності кута розвалу разом із тертям ковзання.

Доповнено дослідження авторів у суміжних наукових темах теоретичним розрахунком місць найбільшого тертя по поверхні шини. Також доповнено можливість уточнення та аналіз найнапруженіших місць тертя поверхні шини та дорожнього полотна для аналізу дисипації енергії в парі тертя.

Математично описано принцип проковзування поверхні шини колеса відносно дорожнього покриття.

У розрізі отриманих результатів відбувається проведення подальших теоретичних та експериментальних досліджень. Розглядається проведення математичного моделювання втрат енергії від проковзування та тертя, а також вплив проковзування на знос шин авто. Також проводяться лабораторні

дослідження для порівняння результатів математичного моделювання із результатами тестування фізичних зразків.

References

1. Barhe, S. G., and Gawalwad, B. G. (2016). Measurement of wheel alignment using IR sensor, *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, Vol. 4, ISSN 2349-4476, 2016.
2. Verbytskyi V. H. (2016). Doslidzhennia kutiv skhodzhennia kolis pry riznykh shvydkostiakh rukhu avtomobilia [Study of the angles of convergence of the wheels at different speeds of the car]. *Avtomobil i Elektronika. Suchas-ni Tekhnolohii*, 10, 81-85 [in Ukrainian].
3. A. K. Patil and V. L. Kadlag. (2016). Design of wheel alignment measuring system using infrared transmissions, *International Journal of Technical Research and Applications*, e-ISSN: 2320-8163, 4, 5, 4-6.
4. R. Furferi, L. Governi, Y. Volpe, and M. Carfagni. (2013). Design and assessment of a machine vision system for automatic vehicle alignment, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, 242.
5. Das, R. K., Hossain, A. M., Islam, T., & Banik, S. C. (2022). Effect of front right toe-out angles on fuel consumption for a light vehicle. *South Florida Journal of Development*, 3, 3, 3724-3735.
6. Shcherbyna A. V. (2016). Zmina kutiv skhodzhennia kolis na perekhidnykh rezhymakh rukhu avtomobilia [Changing the angles of convergence of the wheels in the transition modes of the car]. *Avtomobil i Elektronika. Suchas-ni Tekhnolohii*, Vol. 10, 97-102 [in Ukrainian].
7. Zhuravel D. P., Bondar A. M. (2020) Perspektyvnyi sposib pidvyshchennia kerovanosti kolisnykh mashyn [A promising method of improving the controllability of wheeled vehicles]. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Melitopol: TDATU*, Vol.20, t. 4, 279[in Ukrainian].
8. Karpenko, V., Kaps'kyi, D., Rudenko, N., & Neskreba, E. (2021). Determining the starting time of car movement to stabilize the internal pressure and the temperature in the tires. *Automobile Transport*, 48, 38-44. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2021.48.0.38>
9. Karpenko, V., Voropay, O., & Neskreba, E. (2022). Indirect assessment of the rolling resistance of a car tire in the starting mode of motion. *Automobile Transport*, 50, 5-13. <https://doi.org/10.30977/AT.2019-8342.2022.50.0.01>
10. Karpenko, V., Neskreba, E. (2022). Refined assessment of tire rolling resistance in the starting mode. *Automobile Transport*, 51, 5-13. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2022.51.0.01>
11. Popov S. V., Buchynskiy M. Ya., Hnitko S. M., Cherniavskiy A. M. (2019). Teoriia mekhanizmiv tekhnolohichnykh mashyn: pidruchnyk dlia studentiv mekhanichnykh spetsialnostei zkladiv vyshchoi osvity [Theory of mechanisms of technological machines: a textbook for students of mechanical specialties of higher education institutions]. *Navch. posibny'k* [in Ukrainian].
12. Cui, H., Wang, Q., Lian, Z. et al. (2019). Theoretical Model and Experimental Research on Friction and Torque Characteristics of Hydro-viscous Drive in Mixed Friction Stage. *Chin. J. Mech. Eng.* 32, 80.
13. O. P. Manoilenko, B. S. Zavertannyi, O. O. Akymov. (2020). The research of the process of forging a rolling roller through the pack of the final form of rewinding machines. *Vlákna a textil (Fibres and Textiles)*. 27, 2, 69-73.
14. Syvak R. I., Derevenko I. A. (2014). Korotkyi kurs teoretychnoi mekhaniky [A short course in the theoretical mechanics]. *Navch. posibny'k* [in Ukrainian].
15. Miniailo A. V., Tishchenko L. M., Mazorenko D. I. (2013). *Detali mashyn* [Machine details]. *Navch. posibny'k* [in Ukrainian].