

Крайник Л.В.<sup>1</sup>, Рубан Д.П.<sup>1</sup>, Сукач О.М.<sup>1</sup>, Миронюк О.С.<sup>1</sup>, Кубай О.С.<sup>2</sup>, Пастернак А.Я.<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, Львів, Україна; <sup>2</sup>Львівське вище професійне училище комп'ютерних технологій та будівництва, Львів, Україна

## АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ВЗАЄМОДІЇ ШИНИ З ҐРУНТОВОЮ ПОВЕРХНЕЮ

У статті розглянуто питання агроекологічної оцінки ущільнення ґрунту колесами машинно-тракторних агрегатів з урахуванням реальних умов їх взаємодії з деформівною опорною поверхнею. Показано, що існуюча нормативна база базується на значеннях площі плями контакту шин з жорсткою поверхнею за номінальних параметрів навантаження та тиску повітря, що не відображає фактичних умов роботи на ґрунтах. Обґрунтовано, що на ґрунтових поверхнях площа контакту є більшою та залежить від типу і стану ґрунту, навантаження на колесо та тиску повітря в шині.

На основі аналізу сучасних досліджень і результатів експериментальних вимірювань площі плями контакту поширених типорозмірів тракторних шин проведено оцінку емпіричних залежностей для розрахунку площі контакту шини з ґрунтом та їх зіставлення з експериментальними даними. Досліджено формування питомого тиску в зоні контакту, глибини колії та зміни цих показників при проходженні наступних осей.

Виконано аналіз впливу типорозміру шин, тиску повітря та навантаження на колесо на характеристики взаємодії з ґрунтами різної твердості, що оцінювалися за значенням конусного індексу *CI*. Отримані результати можуть бути використані для уточнення нормативних підходів до агроекологічної оцінки впливу колісної техніки на ґрунтову опорну поверхню.

**Ключові слова:** машинно-тракторні агрегати, автомобілі, бездоріжжя, колесо, прохідність, пляма контакту, ущільнення ґрунту, агроекологія, конусний індекс (*CI*), тиск повітря у шині, типорозмір шин.

### ВСТУП

Актуальність розвитку повнопривідних автомобілів і аграрних машин для експлуатації в умовах бездоріжжя зумовлена як сучасними викликами у сфері транспорту, так і потребами сільського та лісового господарства. Існує значна потреба у мало- і середньотонажній колісній техніці, яка здатна ефективно працювати на деформівних опорних поверхнях за змінних умов навантаження, зчеплення та тиску в шинах, у тому числі з врахуванням умов національної безпеки і економії коштів (за прикладом і інших постсоціалістичних країн – членів НАТО, які активно розвивають виробництво власної колісної техніки). Досі в автопарку цього класу в Україні ще домінують автомобілі радянського виробництва. Очевидна і необхідність розвитку відповідної наукової школи, як бази дослідно - конструкторських робіт з розробки автомобілів цієї категорії з врахуванням тенденцій і змін, характерних для нового покоління військової автотехніки (ВАТ), поточний перехід, який здійснюється у європейських країнах.

Сучасні тенденції розвитку автомобільної техніки підвищеної прохідності передбачають використання науково обґрунтованих методів оцінки взаємодії колісних рушіїв з ґрунтовою поверхнею. У міжнародній практиці для таких задач широко застосовується методика WES, розроблена та впроваджена Інженерним корпусом армії США, яка базується на використанні інтегрального показника твердості опорної поверхні - конусного індексу (*CI*).

Застосування зазначеного підходу дозволяє здійснювати комплексну оцінку прохідності колісної техніки, прогнозувати глибину колії та питомий тиск у контакті шини з ґрунтом, а також узгоджувати результати експериментальних і розрахункових досліджень. Методика WES використовується в країнах НАТО та відповідає сучасним вимогам до проєктування і експлуатації автомобілів та машин різноманітного призначення.

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідження прохідності автомобілів і, відповідно, оцінка взаємодії шин з деформівними опорними поверхнями в Україні розвивалися протягом другої половини ХХ століття. Зокрема з середини 1950-х і до початку 1980-х р.р. результати досліджень висвітлено в працях проф. Біруля А.І., проф. Безбородова Г.Б., проф. Кошарного М.Ф. [1-3], у роки Незалежності – щодо колісних тракторів в аспекті агроекології – проф. Реброва О.Ю. [4]. У цей період було сформовано аналітичні підходи до опису процесів контакту колеса з ґрунтом, що ґрунтувалися на експериментальному визначенні фізико-механічних характеристик опорної поверхні. У подальшому ці підходи були адаптовані та розвинуті в наукових роботах, присвячених оцінці впливу колісних рушіїв на ґрунт, зокрема в аспекті агроекології та експлуатації сільськогосподарської техніки.

Зазначені методики базувалися на використанні кількох показників, що характеризують опір вертикальній деформації ґрунту та його зсуву в горизонтальній площині, зокрема модуля деформації та параметрів міцності [4]. Такий підхід дозволяв детально описувати окремі складові взаємодії колеса з опорною поверхнею, проте потребував значних експериментальних витрат і складної процедури вимірювань.

Паралельно з цими дослідженнями у міжнародній практиці був сформований альтернативний підхід до оцінки прохідності та взаємодії рушіїв з ґрунтом. Ще до Другої світової війни Інженерним корпусом армії США була розроблена комбінована методика, що передбачає використання одного інтегрального показника твердості опорної поверхні - конусного індексу ( $CI$ ). Цей показник отримав подальший розвиток у межах методики WES та був впроваджений у країнах НАТО, а також у цивільних сферах експлуатації техніки на бездоріжжі [7 - 8].

Використання конусного індексу, що визначається за допомогою стандартизованого конусного наконечника, забезпечує комплексну оцінку опорної поверхні з урахуванням одночасної дії вертикального стиску та зсуву ґрунту. Вказаний підхід є більш наближеним до реальних умов навантаження шини та регламентується міжнародним стандартом ISO [9], який застосовується і в національній нормативній базі України.

Механіка взаємодії еластичної шини з деформівною опорною поверхнею описується різними емпіричними залежностями, що базуються на використанні показників, які характеризують деформаційні властивості ґрунту або піску. Залежно від прийнятого підходу, у моделях враховуються як окремі фізико-механічні характеристики опорної поверхні, так і інтегральні показники, що поєднують ефекти стиску та зсуву [8, 11].

У класичній теорії руху автомобіля опір рухові і зчеплення шини з деформівною поверхнею окрім звичного для доріг з твердим покриттям опору коченню шини внаслідок її деформації і гістерезисних втрат у самій шині  $f_{ш}$  додатково формується [5, 6, 7] (рис. 1):

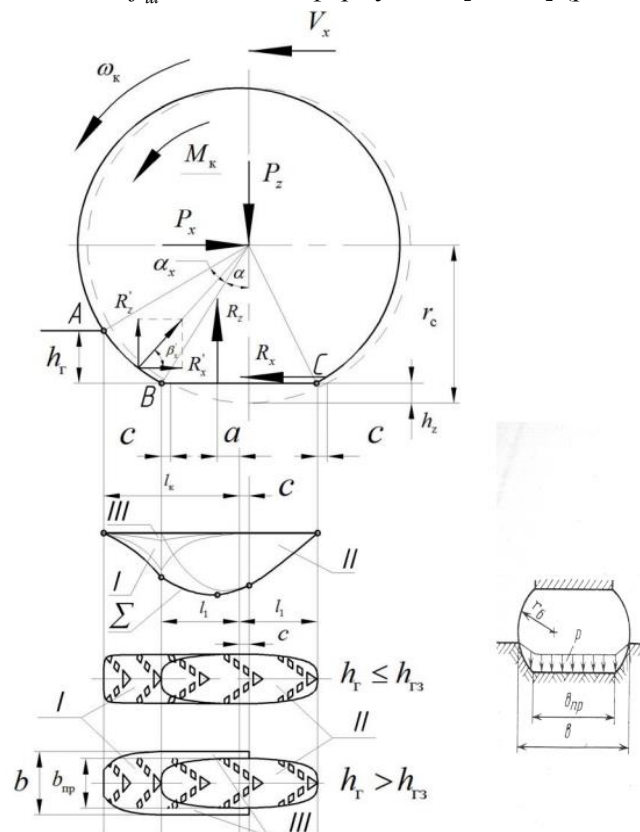


Рисунок 1 - Розрахункова схема взаємодії колеса з ґрунтом

- деформацією опорної поверхні та утворенням колії певної глибини  $f_2$ ;
- опором зміщенню ґрунту (піску) від зсуву вперед (т.зв. бульдозерний ефект)  $f_6$ ;

- опором додаткових затрат енергії внаслідок пробуксовування ведучого колеса і додаткового заглиблення в опорну поверхню та переміщення частини ґрунту (піску) із зони контакту у напрямку обертання колеса (екскалаційний ефект)  $f_E$ ;

- опором горизонтального зміщення верхньої частини опорної поверхні, еквівалентної поперечній площині колії, що утворюється внаслідок руху колеса (тиск відпаду)  $f_g$ ;

- для зв'язних вологих опорних поверхонь також додатковий опір коченню колеса внаслідок прилипання частинок ґрунту до шини  $f_n$ .

Практично аналогічні чинники формують і силу зчеплення шини з опорною поверхнею.

На рис.1 представлено схему взаємодії пневматичної шини колеса автомобіля з ґрунтом – опорною поверхнею [1 - 5], де:  $h_e$  – висота деформації ґрунту (глибина колії);  $h_{e3}$  – висота ґрунтозачепів (профілю шини);  $b$  – ширина колії;  $b_{np}$  – ширина протектора шини;  $M_k$  – крутний момент на колесі;  $V_x$  – лінійна швидкість осі колеса (автомобіля) у поздовжньому напрямі;  $\omega_k$  – кутова швидкість обертання колеса;  $P_z$  – вертикальне навантаження на колесо;  $P_x$  – зусилля опору руху колеса, що передається на основу автомобіля;

Окрім сил  $P_z$  і  $P_x$  та крутного моменту  $M_k$ , що діють на колесо (рис.1), останнє взаємодіє у даному випадку з ґрунтом, що деформується під впливом цих сил. Відповідно, пляма – зона контакту шини з ґрунтом поділена на 3 зони (рис.1):

- перша область (дуга  $AB$ ) у передній частині контакту, що позначена цифрою  $I$  – різної форми (на вигляді зверху, рис. 1 – залежно від співвідношення висоти ґрунтозачепів протектора  $h_{e3}$  та глибини деформації  $h_e$ );

- друга область (дуга  $BC$ ) – зона взаємодії шини з плоскою зоною контакту з опорною поверхнею під дією вертикальної сили  $P_z$  та формування тягового зусилля  $R_x$ ;

- третя область (цифра  $III$  – на рис.1) появляється внаслідок контакту боковини шини з ґрунтом, коли величина нормальній деформації ґрунту/піску  $h_e$  перевищує висоту ґрунтозачепів протектора шини  $h_{e3}$ .

Практично коефіцієнт опору власне коченню колеса формується 2-ма складовими. Перша складова передбачає кочення еластичної шини у веденому режимі:

$$f_0 = \frac{(1 + 0,473 \times 10^{-3} \times V_x^2) \times (\alpha_f + \beta_f \cdot R_z^2)}{1 + p_w}; \quad (1)$$

де  $p_w$  – тиск повітря у шині,  $\alpha_f$  і  $\beta_f$  – емпіричні коефіцієнти для даного типу шини.

Друга складова коефіцієнту опору коченню обумовлена передачею підведеного крутного моменту  $M_k$ :

$$f_m = \frac{\lambda_k \times M_k^2}{R_z \times r_{k0} \times r_k} \quad (2)$$

В межах другої зони контакту  $BC$  (рис.1) формується поздовжнє тягове зусилля  $R_x$ , величина якого визначається підведеним крутним моментом  $M_k$  та обмежується силою зчеплення – вертикальним навантаженням на колесо  $P_z$ , але це на твердій опорній поверхні, а тут частина  $P_z$  припадає і на зони деформації ґрунту  $I$  і  $III$ . На рис.1 показано відповідні епюри розподілу величин нормальних навантажень, віднесених до поздовжньої координати  $x$  (у т.ч. і у зоні  $II$ ) та сумарна епюра розподілу навантажень. Відповідно в умовах опорної поверхні, що деформується, у зоні  $II$  діє не повна  $P_z$ , що відображається реакцією  $R_z$  (з врахуванням частини реакції опрної поверхні у зоні  $I$ ):

$$R_z = P_z - R'_z. \quad (3)$$

Звідси, глибина колії  $h_z$ :

$$h_z = \frac{K_z \times (R_z)^{0,75}}{1 + 10 \times p_w}, \quad (4)$$

де:  $K_z$  – емпіричний коефіцієнт для даної моделі шини.

Очевидно, що практична реалізація цієї моделі ускладнена необхідністю додаткового визначення 3-х емпіричних показників для даної моделі шини. Окрім позитивного чинника – врахування тиску повітря в шині залишається, однак, відкритим питанням врахування твердості опорної поверхні – ґрунту, що є одним з визначальних для формування глибини колії і не фігурує у (4). Окрім цього досить невизначеним залишається питання розрахунку коефіцієнтів опору руху колеса через деформацію і переміщення ґрунту, нагрівання ґрунту перед колесом (бульдозерний ефект), а для чорноземів – додатково і налипання ґрунту. Розрахунок цих показників базується на додатковому визначенні ще ряду емпіричних параметрів шини і ґрунту:

$$f_r = q_o \times z \times 0,3 \times \left( \frac{B + B_1}{W_z} \right), \quad (5)$$

де:  $q_o$  – тиск статичний, у роботі [4] – динамічний у контактї шини з опорною поверхнею;  $z$  – глибина колії;  $W_z$  – вертикальне навантаження на колесо;  $B_1$  – ширина колії.

Тобто для розрахунку (5) необхідна також додаткова кількісна оцінка, окрім модуля  $E$  таких фізико-механічних характеристик опорної поверхні, як:

- кут внутрішнього тертя в ОП (ґрунті)  $\varphi_0$ ;
- опір ґрунту зсуву;
- внутрішнє зчеплення у ґрунті  $C_0$ .

Окрім цього необхідно і розрахувати питомий тиск у контактї шини з опорною поверхнею, а, відповідно і площу плями контакту. Залежності (5) обумовлюють необхідність попереднього розрахунку щодо оцінки значень питомого тиску  $q$  у контактї шини з поверхнею та глибини  $z$  і ширини  $B_1$  утвореної колії:

$$q = 0,5 \times \delta_r \times \frac{P_w + P_k}{B_1} \times \left( \frac{B}{H} + \frac{3H}{B} \right) \times \left( 1 - \frac{\delta_r}{B} \right). \quad (6)$$

Звідси динамічне значення питомого тиску у контактї шини з опорною поверхнею:

$$q_o = \frac{q}{1 + \frac{V_a}{2 \times \varphi_0 \times n \times l}} \quad (7)$$

$$q_o = \frac{E \times z}{0,5 \times a \times (B + B_k) \times \arctg \left( \frac{H_r - z}{0,5 \times a \times (B + B_k)} \right)} + \frac{2E \times Z \times \arctg \left( \pi \frac{H_r - z}{(B + B_k)} \right)}{\pi \times q_s} \quad (8)$$

де  $q$  – статичний тиск у контактї шини з опорною поверхнею;  $P_w$  – тиск повітря у шині;  $P_k$  – тиск на опорну поверхню залежно від жорсткості каркаса шини;  $\delta_r$  – деформація шини на опорній поверхні;  $q_o$  – динамічний тиск у контактї шини з опорною поверхнею;  $V_a$  – швидкість автомобіля;  $z$  – глибина колії;  $n$  – кількість осей;  $l$  – довжина поверхні контакту колеса з опорною поверхнею;  $f_r$  – товщина м'якого шару опорної поверхні;  $q_s$  – несівна здатність ґрунту;  $a$  – коефіцієнт зміни напружень в опорній поверхні за глибиною.

Взаємопов'язане з  $q$  і  $q_o$  значення глибини колії  $z$  визначається спільним розв'язком рівнянь (6) – (8) та залежності [9]:

$$z = \left( \frac{W_z}{C_\Gamma \times F_{III} \times 10^6} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (9)$$

де  $C_\Gamma$  – коефіцієнт деформації ґрунту;  $F_{III}$  – площа плями контакту шини з ОП;  $\gamma$  – показник щільності ґрунту.

У свою чергу площа плями контакту  $F_{III}$  визначається спрощеним прямокутним контуром з ширини колії  $B_K$  та довжини плями контакту  $l$  і з врахуванням перерозподілу відомого вертикального навантаження на колесо  $W_z$  та деформаційних характеристик шини і опорної поверхні:

$$W_z = 0,25 \times \pi \times q \times \left[ (1 - 0,5\xi) \times B \times 2\sqrt{D \times \delta - \delta^2} + \xi \times B_K \sqrt{D(\delta + z) - (\delta + z)^2} \right]. \quad (10)$$

Додаткові уточнювальні складові опору рухові від горизонтального зміщення опорної поверхні:

- бульдозерний ефект для гальмування та ведених коліс:

$$f_o = 0,5 \times \gamma \times q \times z \times \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right) + 2 \times C_o \times \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right); \quad (11)$$

- ескалаційний ефект для ведучих коліс під час пробуксовування:

$$f_e = \frac{1,5 \times 10^6}{(\mu + 1)^{W_z}} \times \left[ \frac{Z_\Pi \times (L_\Pi - e_\Pi)}{(1 - S_o) \times (0,5D - \delta) \times 2 \arcsin \frac{L_\Pi}{D}} \right]^{\mu-1} \times B_K \times C, \quad (12)$$

де  $Z_\Pi$ ,  $L_\Pi$ ,  $e_\Pi$  – висота, крок, ширина ґрунтозачепів протектора шини;  $C$  – безрозмірний емпіричний коефіцієнт опорної поверхні;  $S_o$  – коефіцієнт пробуксовування колеса.

Ефект ескалації ґрунту супроводжується винесенням часток опорної поверхні із зони контакту і відповідним додатковим поглибленням колії  $\Delta Z$ .

Прилипання частинок ґрунту або піску у впадинах протектора:

$$f_\Pi = 0,5 q_\Pi \times B \times \frac{L}{W_z}, \quad (13)$$

де  $q_\Pi$  – питома сила прилипання часток мокрої опорної поверхні до колеса.

Очевидно, що методика розрахунку сумарного опору рухові автомобіля на деформівних ґрунтових опорних поверхнях за багатопараметричними методиками є достатньо складною та потребує експериментального визначення несівної здатності ґрунту за кількома фізико-механічними показниками. Такий підхід характеризується значними трудовими витратами та обмеженою придатністю для оперативних інженерних оцінок.

Разом з тим більшість аналітичних залежностей, що використовуються для розрахунку опору коченню та деформації ґрунту або піску, мають переважно лінійний характер. Експериментальні дослідження показують, що за умов зниження тиску повітря в шинах до значень порядку 0,05–0,1 МПа залежності набувають виражено нелінійного характеру. Зазначений діапазон тиску є типовим для легких і надлегких автомобілів повною масою до 5–6 т, які становлять значну частку сучасного парку колісної техніки підвищеної прохідності, є явно нелінійними (рис. 2).

Важливим чинником формування опору деформації ґрунту є його тип і поточний стан, зокрема вологість, щільність та структурні особливості. У низці моделей цей вплив враховується опосередковано через визначення глибини колії (рис. 3) та побічно враховується у (5), однак без прямого врахування показників твердості опорної поверхні. Такий підхід може призводити до зниження точності розрахунків у змінних ґрунтових умовах.

У різних нормативно-методичних підходах до підбору та оцінки шин для колісної техніки застосовуються різні критерії та рівень деталізації розрахунків. Частина методик орієнтована на спрощені інженерні оцінки, що забезпечують прийнятний рівень практичної застосовності, але не завжди дозволяють всебічно оцінити вплив параметрів шини та стану опорної поверхні на прохідність.

У міжнародній практиці, зокрема в межах методики WES, яка використовується в країнах НАТО, реалізовано спрощений прикладний підхід з акцентом на оперативну оцінку прохідності місцевості та прогнозування потенційної швидкості руху колісної техніки. Вказаний підхід базується на інтегральних показниках і орієнтований на аналіз руху в реальних експлуатаційних умовах.

Водночас у ряді класичних інженерних моделей основна увага приділяється оцінці максимального тягового зусилля, яке може бути реалізоване на колісному русії за низьких швидкостей руху. Хоча такі показники є інформативними для окремих режимів роботи, вони мають обмежене застосування для оцінки ефективності руху бездоріжжям у широкому діапазоні швидкостей та не повною мірою відображають реальні умови експлуатації колісної техніки [10].

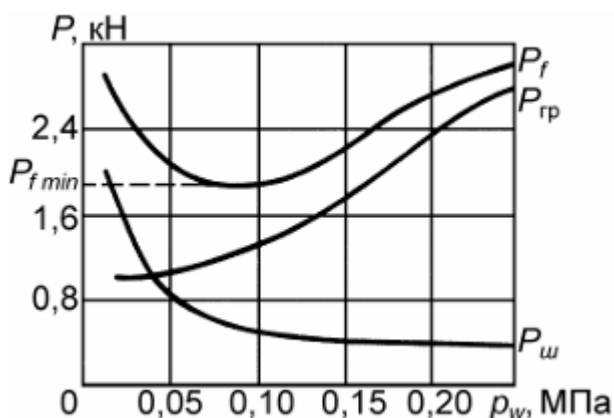


Рисунок 2 - Вплив тиску повітря у шинах  $p_w$  14,00-18" на силу опору руху  $P_f$  на піску (де  $P_{ш}$  – опір коченню шин,  $P_{гр}$  – опір деформації ґрунту)

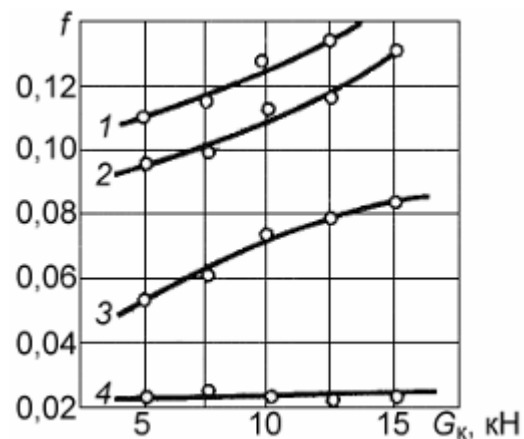


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта опору кочення  $f$  від навантаження на колесо  $G_k$  (12,00-18"):

1 – вологий суглинок; 2 – сухий пісок;  
3 – ґрунтова дорога; 4 – асфальт

Попередня та послідовно деталізована оцінка взаємодії коліс військової автомобільної техніки з опорною поверхнею у країнах НАТО є стандартизованою та ґрунтується на поетапному підході, характерному для методики WES, що забезпечує оперативність оцінювання та достатню інженерну точність при аналізі потенційної прохідності.

На першому етапі здійснюється оцінка прохідності на основі експериментального визначення конусного індексу  $CI$  та базових геометричних і навантажувальних параметрів автомобіля, зокрема діаметра колеса  $D$ , його ширини  $B$ , а в окремих випадках — навантаження на колесо, висоти шини  $H$  та її радіальної деформації  $h_z$ . На підставі цих даних виконується розрахунок індексу мобільності (mobility number,  $MN$ ), який є узагальненим показником потенційної прохідності конкретного зразка техніки.

Отримане значення  $MN$  використовується як вихідний параметр для вибору відповідних емпіричних моделей взаємодії шини з опорною поверхнею конкретного типу. Це дозволяє кількісно оцінити характеристики опору рухові та зчеплення коліс з ґрунтом у заданих умовах експлуатації.

На наступному етапі визначається глибина колії як інтегральний показник прохідності для даного типу техніки. Одночасно розраховується порогове значення конусного індексу  $VCI$  (Vehicle Cone Index), яке встановлюється на основі співвідношення між фактичним значенням  $CI$  опорної поверхні та індексом мобільності  $MN$ . Значення  $VCI$  використовується як критерій оцінки можливості руху техніки без втрати прохідності за заданих ґрунтових умов [6-11].

Щодо 6 різновидів однотипної емпіричної залежності з визначення індексу прохідності  $MN$  – залежність запропоновану D. Rowland [16], що використовується і у військових відомствах Англії та ФРН:

$$MN_R = \frac{CI \times B^{0,85} \times D^{1,15}}{W} \sqrt{\frac{\delta}{B}}, \quad (14)$$

де  $CI$  – значення конусного індексу, МПа;  $W$  – вага автомобіля, т;  $D, B$  – діаметр і ширина шин, м;  $\delta$  – деформація шини під номінальним навантаженням на твердій опорній поверхні, або більш просту залежність  $D$ . Freitag з корекцією, введеною у практику інженерним корпусом армії США [15].

$$MN_F = \frac{CI \times B \times D}{W} \sqrt{\frac{h_z}{H_T}} \times \left( \frac{1}{1 + \frac{B}{2D}} \right), \quad (15)$$

де  $h_z$  – радіальна деформація шини на твердій ОП під дією вертикального навантаження на колесо, м;  $H_T$  – висота шини, (різниця зовнішнього та внутрішнього діаметрів), м.

Відповідно теоретична оцінка глибини колії на опорній поверхні визначається [9]:

$$z = \left( 0,003 + \frac{0,287}{MN_F} \right) \times D \quad \text{або} \quad z = \left( -0,001 + \frac{0,248}{MN_R} \right) \times D. \quad (16)$$

Остання є визначальною для комплексного розрахунку відповідно до коефіцієнтів зчеплення  $\mu$  та сумарного опору рухові шини без врахування мікропрофілю місцевості, відповідно при використанні  $MN_F$  [9]:

$$\mu = 0,84 - \frac{1,31}{MN_F - 2,45} + \frac{0,2}{MN_F - 2,5} \quad \text{та} \quad f = 0,04 + \frac{0,2}{MN_F - 2,5}, \quad (17)$$

або при використанні  $MN_R$ :

$$\mu = 0,84 - \frac{1,31}{MN_R - 0,95} + \frac{0,2}{MN_R - 1,35} \quad \text{та} \quad f = 0,04 + \frac{0,2}{MN_R - 1,35}. \quad (18)$$

Як свідчить аналіз відомих досліджень власне залежності (17) - (18) забезпечують кращу збіжність результатів розрахунку та дорожніх випробувань насамперед на ґрунтових опорних поверхнях.

Вищевикладені основні положення WES-методики покладені і в основу нормативної бази Об'єднання німецьких інженерів (VDI) щодо проектування та експлуатації колісних та гусеничних машин в умовах бездоріжжя – аграрних угідь [16]. Дана методологія використовується також в ЄС, США і інших країнах і агроекологічної оцінки автомобілів і тракторів у сільському та лісовому господарстві [22 - 25].

### ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Актуальність розвитку в Україні власного виробництва мало- і середньотонажної автотехніки підвищеної прохідності як з умов національної безпеки, оновлення застарілого автопарку ЗСУ, так і розвитку сільськогосподарського та лісового господарства є очевидною і практично можливою (у т.ч. і з реалій інших постсоціалістичних країн). У цьому плані базою відповідних дослідно-конструкторських робіт є опрацювання сучасних методичних засад оцінки динаміки та енергозатратності руху колісних машин бездоріжжям.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В основі теорії руху колісної техніки бездоріжжям лежить опис і моделювання взаємодії пневматичних шин з деформівною опорною поверхнею, зокрема ґрунтовою або піщаною. Ефективність моделювання значною мірою визначається вибором показників, які використовуються для характеристики фізико-механічних властивостей опорної поверхні.

У цьому контексті методика WES має суттєві переваги, оскільки для оцінки властивостей ґрунту або піску достатньо визначення одного інтегрального показника - конусного індексу ( $CI$ ). Використання  $CI$  дозволяє оперативно оцінювати несівну здатність опорної поверхні та застосовувати узагальнені емпіричні залежності для прогнозування прохідності і глибини колії. На відміну від цього, багатопараметричні підходи потребують трудомісткого експериментального визначення кількох фізико-механічних характеристик ґрунту із застосуванням різного вимірювального обладнання, у багатьох випадках вимірювання виконуються в умовах стаціонарних лабораторій, що обмежує можливість їх оперативного застосування безпосередньо в польових умовах. Це істотно ускладнює використання багатопараметричних методик для швидкої інженерної оцінки прохідності колісної техніки за змінних характеристик ґрунтової опорної поверхні та мінливих погодних умов.

Слід зазначити, що результати дослідження із застосуванням WES-методики [17] обмежено представлені для окремих типів ґрунтів, зокрема чорноземів, які є домінуючими в Україні. Це зумовлює необхідність адаптації та уточнення наявних моделей з урахуванням специфіки ґрунтових опорних поверхонь.

Для оцінки адекватності теоретичного розрахунку коефіцієнтів сумарного опору руху  $f$  та зчеплення  $\mu$  колеса з ґрунтовою поверхнею з відомим значенням  $CI$  згідно (17), що використовується в армії США, були проведені експериментальні заїзди повнопривідної вантажівки КамАЗ 4310 (табл.1) для 2-х вагових станів та 4-х значень регульованого тиску повітря у шинах при русі з постійною швидкістю 20 км/год. Шини стандартні – 425/85R20 з діапазоном зміни тиску повітря 0,1 – 0,4 МПа.

Таблиця 1 - Маса та розподіл навантажень на осі КамАЗ 4310

Ваговий стан	Маса автомобіля, кг	Розподіл навантажень на осі, кг		
		Передня вісь	Середня	Задня вісь
споряджена	8715	4315	2220	2210
повна	15100	4910	5095	5095

Випробування проводились на типовому для заходу України суглинку - зоране поле з перепадом висот профілю в діапазоні 5-10 см та вмістом води 31%. Твердість ґрунту  $CI$  на глибині 10 см у діапазоні 440-480 кПа (20 замірів у різних місцях ділянки твердоміром ЛАН-М PRO [20] з змінним конусним наконечником під вимоги WES –методики [18, 20] та відповідним таруванням програмного блоку приладу). Довжина ділянки фіксації даних – 50 м з здійсненням проїздів на відстані 40-50 см від колії попередніх проїздів. Комплекс вимірювальної апаратури описаний у [10]. Додатково фіксувалось положення педалі паливоподачі – рейки паливного насоса високого тиску, що при усталеній швидкості руху 20 км/год та фіксації частоти обертання вала двигуна дозволило за відомою регуляторною характеристикою двигуна КамАЗ-740 визначити орієнтовний крутний момент, що передається через включену другу понижену передачу трансмісії на колеса для переборення опору рухові. Радіальна деформація шини  $h_z$  на бетонній поверхні для навантажень спорядженої маси та повного завантаження була визначена при 4-х значеннях тиску повітря у шині.

Паралельно проведені і комп'ютеризовані розрахунки значень опору руху у програмному середовищі MATLAB Simulink за опрацьованою моделлю щодо КамАЗ 4310 [21, 24] з розмежуванням значень по осях. (При цьому, однак, задавалось опосередковане значення твердості ґрунту  $CI = 460$  кПа та не враховувались вищезгадані стохастичні перепади висот профілю поверхні ґрунту). Відхилення значень отриманих експериментально – розрахунково та шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання є достатньо відчутні – у межах 7-15%, але цілком прийнятні і зрозумілі. Отриманий рівень збіжності результатів можна вважати прийнятним для інженерних оцінок і подальшого аналізу взаємодії колісної техніки з деформівною опорною поверхнею, враховуючи реалії прийнятих спрощень та відмінностей між теоретично еталонною регуляторною характеристикою двигуна і реальною в експлуатації з пробігом автомобіля понад 110 тис. км.

Узагальнені отримані залежності сумарного опору коченню коліс усіх трьох осей автомобіля представлені на рис.4.

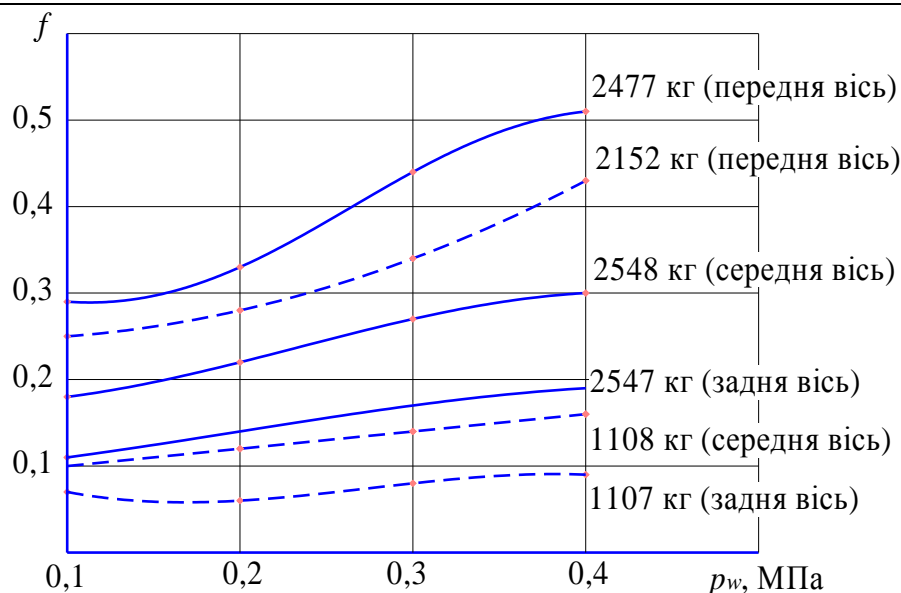


Рисунок 4 – Закономірності зміни коефіцієнта опору коченню коліс осей автомобіля залежно від навантаження на колесо та тиску повітря у шинах  $p_w$

Найбільші відхилення між експериментальними даними та результатами імітаційного комп'ютеризованого моделювання (12-15%) зафіксовані для спорядженого стану автомобіля. Такі розбіжності зумовлені особливостями задання параметрів ущільнення опорної поверхні в комп'ютерній моделі після проходження передньої осі. Зокрема, у розрахунках використовувалися табличні залежності WES-методики [10], що визначалась для повної маси автомобіля і рівномірного розподілу навантажень по осях.

Зазначена невідповідність умов моделювання реальному експерименту пояснює підвищені відхилення результатів і водночас підтверджує чутливість розрахункових моделей до параметрів навантаження та ступеня ущільнення опорної поверхні.

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Насамперед слід відзначити суттєву залежність опору руху коліс на глинистих ґрунтах, що деформуються, від тиску повітря у шинах. Як видно з рисунку 4, для коліс передньої осі ця залежність є найбільш вираженою та практично не залежить від загального завантаження автомобіля. Зміна коефіцієнта опору руху в діапазоні 1,6–1,8 раза свідчить про визначальний вплив тиску в шинах на характер напружено-деформованого стану ґрунту в зоні контакту. Це пояснюється зміною площі плями контакту та розподілу нормальних напружень у ґрунті. Зменшення тиску в шині призводить до збільшення площі контакту та зниження питомого тиску, що зменшує глибину колії та опір деформації. Разом з тим надмірне зниження тиску супроводжується зростанням втрат енергії на внутрішню деформацію шини та підвищенням чутливості до нерівностей мікропрофілю. Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними інших досліджень [16].

З подальшим ущільненням колії після проходження попередніх осей характер взаємодії змінюється. Для третьої за послідовністю осі при спорядженій масі автомобіля спостерігається зміщення оптимального значення тиску повітря в шинах з 0,1 МПа до 0,15–0,2 МПа (рис. 4). Це пов'язано зі зростанням несучої здатності ущільненої опорної поверхні та відповідною зміною співвідношення між деформацією ґрунту і деформацією шини. Отримані результати підтверджують доцільність роздільного регулювання тиску в шинах по осях залежно від навантаження та ступеня ущільнення опорної поверхні, що узгоджується з положеннями [22].

У межах WES-методики основний акцент зроблено на використанні конусного індексу  $CI$  для оцінки прохідності та глибини колії, тоді як геометричні параметри плями контакту безпосередньо не деталізуються. Проте саме площа контакту визначає величину питомого тиску на ґрунт, що є ключовим показником при агроєкологічній оцінці впливу колісної техніки на ґрунтовий покрив.

Характер взаємозв'язку між конусним індексом  $CI$ , навантаженням на колесо та площею контакту може бути встановлений аналітично. Використання значень конусного індексу дозволяє оцінити несівну здатність ґрунту та визначити необхідну площу контакту для забезпечення

допустимого рівня тиску. Відповідні підходи наведені у [19, 21] і дають можливість адаптувати розрахунок до конкретного типу та стану ґрунту.

Застосування WES-методики, доповненої аналітичною оцінкою площі контакту забезпечує більш повну характеристику взаємодії колісної техніки з деформівною опорною поверхнею як з умови прохідності, так і агроекології.

### **ВИСНОВКИ**

Дослідження та аналітичний опис взаємодії пневматичної шини колісної техніки з ґрунтом набувають особливої актуальності в Україні не тільки в аспекті поточної війни, але й необхідності розвитку власного промислового виробництва сучасної військової автотехніки для бездоріжжя, зумовленим зростанням інтенсивності використання машин у сільському та лісовому господарстві. Поширення важких машинно-тракторних агрегатів супроводжується підвищенням навантаження на ґрунт покрив, що загострює проблему переущільнення та деградації сільськогосподарських угідь.

У цьому контексті доцільним є акцент на оцінці опорних поверхонь на основі показників твердості ґрунту, зокрема конусного індексу, а не лише показників його щільності, які традиційно застосовуються в аграрній практиці. Такий підхід є більш адекватним в контексті механіки взаємодії рушія з деформівною опорною поверхнею та відповідає сучасним інженерним дослідженням механізмів формування питомого тиску і глибини колії.

Використання показника твердості ґрунту узгоджується з міжнародною практикою та нормативними документами, зокрема стандартами ISO [11], що застосовуються у транспортних і геотехнічних дослідженнях. У зв'язку з цим доцільним є впровадження відповідних методик як національного стандарту ДСТУ. Застосування застарілих багатопараметричних підходів до опису фізико-механічних характеристик опорних поверхонь у задачах взаємодії з пневматичними шинами та гусеничними рушіями істотно ускладнює інженерні розрахунки та не забезпечує необхідної швидкості й ефективності досліджень в сучасних умовах.

### **ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Завгородний А. М., Мироненко В. І., Сергієнко Н. Є. Оцінка опорної прохідності автомобілів. Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2012. № 60 (966). С. 81–91.
2. Кошарний Н. Ф. Техніко-експлуатаційні властивості автомобілів високої прохідності. Київ : Вища школа, 1981. 208 с.
3. Ребров О. Ю., Кальченко Б. І., Макаров В. А., Якунін М. С., Бучко І. Г., Реброва О. М., Артюшенко О. В., Леленко О. М. Оціночний аналіз дії на ґрунт ходових систем колісних сільськогосподарських тракторів. Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2022. № 1. С. 36–43.
4. Ребров О. Ю. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рушіїв сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях обробітку ґрунту : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.02. Харків : НТУ «ХП», 2021. 423 с.
5. Гащук П. Автомобіль: теорія колісного рушія : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2018. 328 с.
6. Wong J. Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering. 2nd ed. London : Butterworth-Heinemann, 2010. 482 p.
7. Wong J. Y. Theory of ground vehicles. New York : McGraw-Hill, 1993. 423 p.
8. Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прокідність військових автомобілів : монографія. Київ : Професіонал, 2023. 182 с.
9. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. Geneva : ISO, 2012.
10. Волонцевич Д. О., Веретенников Є. А., Костяник І. В., Пасічний С. С., Воронцов С. М., Пильова Т. К. До питання оптимізації передаточних чисел планетарної коробки передач бронетранспортера БТР-4. Механіка та машинобудування. 2014. № 1. С. 75–82.
11. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Андрієнко А. М. Основи формування національної нормативної бази щодо прохідності колісної військової автомобільної техніки. Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 2 (62). С. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.01>.
12. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля : підручник. Суми : Університетська книга, 2019. 320 с.

13. ДСТУ 8815:2018. Шини пневматичні для вантажних колісних транспортних засобів та причепів до них. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
14. Rowland D., Peel J. W. Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1975. No. 205. P. 81–92.
15. Freitag D. R. A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. *Journal of Terramechanics*. 1966. Vol. 3, No. 3. P. 51–68.
16. VDI 6101. Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. Düsseldorf : VDI Verlag, 2007. 39 S.
17. Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка автомобілів і тракторів на базі WES-методології. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021 : матеріали II міжнар. наук.-техн. конф. Вінниця : ВНТУ, 2021. С. 118–120.
18. Сивулька П. Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів в Україні та країнах ЄС. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Агроінженерні дослідження*. 2024. № 28. С. 209–216.
19. Стиранівський О. А., Стиранівський Ю. О. Показники екологічної сприйнятливості трелювання деревини. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2007. Вип. 17.4. С. 83–90.
20. Щільномір для ґрунту ЛАН-М PRO з функцією GPS : вебсайт. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html> (дата звернення: 12.11.2025р.).
21. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України*. 2020. № 2. С. 21–28.
22. Хома В. Ефективність роздільного регулювання тиску в шинах з умов прохідності та мобільності руху бездоріжжям. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Агроінженерні дослідження*. 2023. № 27. С. 22–26.
23. Сивулька П., Сукач О. Оцінка площі плями контакту шини на ґрунтових поверхнях. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2025. № 1 (24). С. 399–408. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747>.
24. Бешун О. А., Ачкевич В. І., Меланченко Я. Д., Шеремет Д. О. Аналіз існуючих моделей взаємодії колеса з опорною поверхнею. *Machinery & Energetics*. 2018. № 282. С. 395–404.
25. Медведєв В. В. Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку. *Вісник аграрної науки*. 2010. № 4. С. 14–18.

## REFERENCES

1. Zavorodnyi, A. M., Myronenko, V. I., & Serhiienko, N. Ye. (2012). Otsinka opornoї prokhidnosti avtomobiliv. *Visnyk NTU “KhPI”. Seriya: Avtomobile- ta Traktorobuduvannia*, (60(966)), 81–91.
2. Kosharnyi, N. F. (1981). *Tekhniko-ekspluatatsiini vlastyvosti avtomobiliv vysokoi prokhidnosti*. Kyiv: Vyshcha shkola.
3. Rebrov, O. Yu., Kalchenko, B. I., Makarov, V. A., Yakunin, M. S., Buchko, I. H., Rebrova, O. M., Artiushenko, O. V., & Lelnenko, O. M. (2022). Otsinochnyi analiz dii na grunt khodovykh system kolisnykh silskohospodarskykh traktoriv. *Visnyk NTU “KhPI”. Seriya: Avtomobile- ta Traktorobuduvannia*, (1), 36–43.
4. Rebrov, O. Yu. (2021). *SCientific substantiation of increasing the effiCienCy of wheeled propulsion systems of agricultural tractors during energy-intensive soil tillage operations* (Doctoral dissertation). National Technical University “KhPI”, Kharkiv, Ukraine.
5. Hashchuk, P. (2018). *Avtomobil: teoriia kolisnoho rushiia*. Kyiv: Kondor.
6. Wong, J. Y. (2010). *Terramechanics and off-road vehicle engineering* (2nd ed.). London: Butterworth-Heinemann.
7. Wong, J. Y. (1993). *Theory of ground vehicles*. New York, NY: McGraw-Hill.
8. Hrubel, M. H., & Krainyk, L. V. (2023). *Prokhidnist viiskovykh avtomobiliv*. Kyiv: Profesional.
9. International Organization for Standardization. (2012). *ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test*. Geneva: ISO.
10. Volontsevych, D. O., Veretennykov, Ye. A., Kostianyk, I. V., Pasichnyi, S. S., Vorontsov, S. M., & Pylova, T. K. (2014). Do pytannia optymizatsii peredatochnykh chysel planetarnoi korobky peredach bronetransportera BTR-4. *Mekhanika ta Mashynobuduvannia*, (1), 75–82.

11. Hrubel, M. H., Krainyk, L. V., & Andriienko, A. M. (2020). Osnovy formuvannia natsionalnoi normatyvnoi bazy shchodo prokhidnosti kolisnoi viiskovoi avtomobilnoi tekhniky. *Systemy Ozbroiennia i Viiskova Tekhnika*, 2(62), 7–17. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.01>
12. Volkov, V. P., & Vil'skyi, H. B. (2019). *Teoriia rukhu avtomobilia*. Sumy: Universytetska knyha.
13. UkrNDNTs. (2018). *DSTU 8815:2018. Pneumatic tires for trucks and trailers. General specifications*. Kyiv: DP "UkrNDNTs".
14. Rowland, D., & Peel, J. W. (1975). Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, (205), 81–92.
15. Freitag, D. R. (1966). A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. *Journal of Terramechanics*, 3(3), 51–68.
16. Verein Deutscher Ingenieure. (2007). *VDI 6101: Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden*. Düsseldorf: VDI Verlag.
17. Krainyk, L., & Syvulka, P. (2021). Ahroekolohichna otsinka avtomobiliv i traktoriv na bazi WES-metodolohii. In *Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference "Perspektyvy rozvytku mashynobuduvannia ta transportu – 2021"* (pp. 118–120). Vinnytsia: VNTU.
18. Syvulka, P. (2024). Porivnialnyi analiz metodyk ahroekolohichnoi otsinky mashynno-traktornykh ahrehativ v Ukraini ta krainakh YeS. *Visnyk Lvivskoho Natsionalnoho Universytetu Pryrodokorystuvannia. Serii: Ahroinzhenerni Doslidzhennia*, (28), 209–216.
19. Styranivskyi, O. A., & Styranivskyi, Yu. O. (2007). Pokaznyky ekolohichnoi spryiniatlyvosti treliuvannia derevyny. *Naukovyi Visnyk NLTU Ukrainy*, 17(4), 83–90.
20. Spectrolab. (n.d.). *LAN-M PRO soil penetrometer with GPS*. <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html>
21. Hrubel, M. H., Krainyk, L. V., & Khoma, V. V. (2020). Imitatsiine modeliuвання rukhu kolisnoi viiskovoi avtomobilnoi tekhniky bezdorozhzhiam ta otsinka yoho adekvatnosti. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, (2), 21–28.
22. Khoma, V. (2023). Efektyvnist rozdilnogo rehuliuвання тyску v shynakh z umov prokhidnosti ta mobilnosti rukhu bezdorozhzhiam. *Visnyk Lvivskoho Natsionalnoho Universytetu Pryrodokorystuvannia. Serii: Ahroinzhenerni Doslidzhennia*, (27), 22–26.
23. Syvulka, P., & Sukach, O. (2025). Otsinka ploshchi pliami kontaktu shyny na gruntovykh poverkhniah. *Suchasni Tekhnolohii v Mashynobuduvanni ta Transporti*, 1(24), 399–408. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747>
24. Beshun, O. A., Achkevych, V. I., Melanchenko, Ya. D., & Sheremet, D. O. (2018). Analiz isnuuichykh modelei vzaiemodii kola z opornoiu poverkhnieu. *Machinery & Energetics*, (282), 395–404.
25. Medvediev, V. V. (2010). Tverdist gruntu yak kryterii dlia obgruntuvannia tekhnolohii tekhnichnykh zasobiv z yoho obrobitku. *Visnyk Ahrarnoi Nauky*, (4), 14–18.

### **Krainyk L.V., Ruban D.P., Sukach O.M., Muronyuk O.S., Kubai O.S., Pasternak A.Ya. Analytical assessment of the interaction between tyre and ground surface**

The paper addresses the agroecological assessment of soil compaction caused by the wheels of machine–tractor aggregates, taking into account real operating conditions of their interaction with deformable supporting surfaces. It is shown that the existing regulatory framework is based on tire contact patch areas determined on rigid surfaces under nominal wheel loads and inflation pressures, which does not adequately reflect actual operating conditions on soils. It is substantiated that on soil surfaces the contact area is larger and depends on soil type and condition, wheel load, and tire inflation pressure.

Based on an analysis of recent studies and the results of experimental measurements of the contact patch area for commonly used tractor tire sizes, empirical relationships for calculating the tire–soil contact area were evaluated and compared with experimental data. The formation of contact pressure, rut depth, and changes in these parameters during the passage of subsequent axles were also investigated.

An analysis was performed of the influence of tire size, inflation pressure, and wheel load on the characteristics of interaction with soils of different hardness, assessed using the cone index (CI). The obtained results can be used to refine regulatory approaches to the agroecological assessment of the impact of wheeled machinery on the soil supporting surface.

**Keywords:** machine–tractor aggregates, vehicles, off-road conditions, wheel, mobility, contact patch, soil compaction, agroecology, cone index (CI), tire inflation pressure, tire size.

*КРАЙНИК Любомир Васильович*, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, e-mail: l.kraynyk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0524-9126>

*РУБАН Дмитро Петрович*, доктор технічних наук, в.о. професора кафедри автомобілів і тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, e-mail: ruban\_dimon@ukr.net.; <https://orcid.org/0000-0002-0671-3226>

*СУКАЧ Олег Михайлович*, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів і тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, e-mail: 19oleg85@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0867-335X>.

*МИРОНЮК Олег Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і тракторів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, e-mail: muronjuk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8997-6509>.

*КУБАЙ Орест Степанович*, викладач, Львівське вище професійне училище комп'ютерних технологій та будівництва, e-mail: or4uk80@gmail.com

*ПАСТЕРНАК Андрій Ярославович*, викладач, Львівське вище професійне училище комп'ютерних технологій та будівництва, e-mail: pasternachok@gmail.com

*Lybomyr KRAINYK*, doctor of technical sciences, department of automobiles and tractors, Stepan Gzhytskyi national university of veterinary medicine and biotechnologies of Lviv, Dublyany, Ukraine.; e-mail: l.kraynyk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0524-9126>

*Dmytro RUBAN*, doctor of technical sciences, department of automobiles and tractors, Stepan Gzhytskyi national university of veterinary medicine and biotechnologies of Lviv, Dublyany, Ukraine., e-mail: ruban\_dimon@ukr.net.; <https://orcid.org/0000-0002-0671-3226>

*Oleh SUKACH*, candidate of technical sciences, associate professor, department of automobiles and tractors, Stepan Gzhytskyi national university of veterinary medicine and biotechnologies of Lviv, Dublyany, Ukraine., e-mail: 19oleg85@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0867-335X>.

*Oleh MURONYUK*, candidate of technical sciences, associate professor, department of automobiles and tractors, Stepan Gzhytskyi national university of veterinary medicine and biotechnologies of Lviv, Dublyany, Ukraine, e-mail: [muronjuk@ukr.net](mailto:muronjuk@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-8997-6509>

*Orest KUBAI*, teacher, Lviv Higher Vocational School of Computer Technologies and Construction, e-mail: or4uk80@gmail.com

*Andrii PASTERNAK*, teacher, Lviv Higher Vocational School of Computer Technologies and Construction, e-mail: pasternachok@gmail.com

Дата надходження статті до видання: 11.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

<https://doi.org/10.36910/07wmt74>