

Сивулька П.М., Сукач О.М.

*Львівський національний університет природокористування, Дубляни, Україна***ОЦІНКА ПЛОЩІ ПЛЯМИ КОНТАКТУ ШИНИ НА ГРУНТОВИХ ПОВЕРХНЯХ**

У статті проведено порівняльний аналіз відомих методик розрахунку плями контакту пневматичної шини колісних машин та опрацьовано пропозиції щодо умов взаємодії з опорними поверхнями, що деформуються. Класична оцінка-розрахунок площі плями контакту шини з опорною поверхнею базується на твердій бетонній поверхні – автодороги 1 категорії. Однак у аграрній та військовій сферах домінують ґрунтові поверхні, що змінює площу контакту. Проведено порівняльний аналіз відомих 3-х основних методик розрахунку площі плями контакту – вітчизняної (введеної в дію 1972 року) для автомобілів загального призначення, західноєвропейської у аграрній сфері та WES – методики військ НАТО.

Для врахування зміни площі плями контакту шини на поверхнях, що деформуються з значним розмаїттям типів і фізико-механічних характеристик, запропоновано використання стандартного у WES – методики показника твердості ґрунту як опорної поверхні колеса – конусного індексу CI (cone index), що використовується для оперативної оцінки прохідності та мобільності руху автотехніки бездоріжжям. Окрім навантаження на колесо значну роль на формування площі контакту відіграє зміна тиску повітря в шині, що теж враховано на основі узагальнених даних щодо відповідної зміни радіальної деформації шини.

Уточнення зміни площі плями контакту шини для конкретних типів і станів ґрунтів дозволяє провести більш коректну агроекологічну оцінку колісних тракторів та автомобілів у конкретних умовах руху.

Ключові слова: ущільнення ґрунтів, автомобіль, трактор, колесо, пляма контакту, тиск, твердість ґрунту.

ВСТУП

Зростаюче розповсюдження важких колісних тракторів класів тяги 3...6 (починаючи з 1980-х років Т 150К, К 700, а на сьогодні практично всіх європейських виробників) у аграрній сфері та великотоннажних автомобілів зумовили актуальність проблеми надмірного ущільнення сільськогосподарських угідь, що спричинює деградацію земель та відповідне зниження урожайності [1, 2 та ін.]. Існуюча вітчизняна нормативна база [3-5] регламентує з умов агроекології граничні допустимі значення питомого навантаження у контакті шин з ґрунтом залежно від пори року, типу ґрунту та вмісту вологи. Однак оцінка – розрахунок тиску колеса на ґрунт вимагає визначення площі плями контакту з опорною поверхнею. Остання ж класично визначається щодо твердої, бетонної опорної поверхні, що не є адекватним для ситуації з деформацією ґрунту/піску, враховуючи різний вміст у ньому вологи.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Тиск у контакті шини з опорною поверхнею переважно оцінюють у підручниках і досі як збільшене у 1,2-1,25 рази значення тиску повітря у шині [6 і ін.]. Однак очевидно, що для спорядженої чи повної маси автомобіля з можливою двократною зміною навантаження на вісь/колесо тиск у контакті змінюється. Зрештою і зниження тиску повітря в шині на 50% не спричиняє аналогічне падіння тиску у контакті [2 і ін.]. Нормативна база [5] не регламентує методику розрахунку площі контакту шини з опорною поверхнею і базується на експериментальному замірі площі відбитка плями контакту на жорсткій основі згідно ДСТУ ГОСТ 7057 з наступним збільшенням у 1,6-1,1 рази, залежно від зовнішнього діаметра колеса (відповідно до ДСТУ 4140). Отримане значення середнього статичного тиску колеса на ґрунт збільшують у 1,5 рази (коефіцієнт поздовжньої нерівномірності розподілення статичного тиску за площею контакту шини, але з приміткою необхідності уточнення з виробниками нових високоеластичних шин, що відсутнє). Питомий тиск у контакті шини з ґрунтом, що деформується, є одним з визначальних чинників як прохідності автомобіля бездоріжжям, так і ущільнення ґрунту з умов агроекології тракторами і автомобілями на сільськогосподарських угіддях. Очевидно, що формування питомого тиску у контакті з опорною поверхнею при конструктивно відомому навантаженні на колесо, визначається площею плями контакту, розрахунок якої у відомих дослідженнях базується на розрахунку контакту конкретної шини з бетонною поверхнею під дією заданого вертикального навантаження від автомобіля.

Зокрема у вітчизняних дослідженнях [6] площа плями контакту шини з опорною (твердою) поверхнею визначається комплексом з 7 формул, що у свою чергу є розвитком простіших залежностей визначення радіальної деформації шини насамперед під впливом вертикального навантаження на колесо на твердій опорній поверхні:

$$F_k = \frac{\pi}{4} a_k b_k \quad (1)$$

де: a_k - велика піввісь еліпса (довжина плями контакту), b_k - мала піввісь (ширина плями контакту). У свою чергу (за статистичними даними типорозмірів шин) останні можуть бути визначені як:

$$a_k = c_3 \sqrt{D f_t - f_t^2} \quad b_k = 2 \sqrt{2 R_{pr} f_t - f_t^2} \quad (2)$$

де: D - статичний діаметр колеса (без навантаження), f_t - прогин шини під дією радіального навантаження на колесо, внутрішнього тиску повітря в шині та ще 3-х постійних для даної шини коефіцієнтів [6], R_{pr} - приведений радіус поперечного перерізу шини, $R_{pr} = \frac{B+H}{2,5}$ (B - ширина шини, H - висота профілю шини); c_3 - коефіцієнт, що залежить від розміру шини та норми шаруватості, ще додатково 4 емпіричні формули [6].

У вітчизняних дослідженнях початково використовувалась більш проста залежність [7, 8]:

$$F_k = \pi h_k \sqrt{(B - h_k)(D - h_k)} \quad (3)$$

де: h_k - глибина колії, утвореної колесом у ґрунті:

$$h_k = G_k / \pi p_k \sqrt{DB} \quad (4)$$

де: G_k - навантаження на колесо, p_k - тиск повітря в шині.

Практично ця ж ситуація характерна і для досліджень та методик, які застосовуються пострадянськими країнами у сфері агроєкології колісної техніки, за винятком нещодавніх публікацій, де на підставі критики існуючої нормативної бази агроєкологічної оцінки – ГОСТ 26953-86, ГОСТ 26953-86 та ГОСТ 26954-86 (що покладені в основу і чинних ДСТУ [3-5]) щодо статичної процедури оцінки нерухомих машин, без врахування перерозподілу навантажень на осі під час руху з навісним чи причіпним устаткуванням, запропоновано доповнену, розширену залежність розрахунку тиску шин на ґрунт. Однак щодо визначення площі плями контакту змін не пропоновано, тобто методика передбачає статичну взаємодію колеса з опорною поверхнею.

В країнах ЄС розрахункове визначення площі плями контакту на ґрунті, що деформується, дещо відрізняється і в основу залежностей покладено два типи ґрунтів – середньої щільності та вологі, де співвідношення отриманої глибини колії z та діаметру колеса D є у межах $0,025 < z/D < 0,05$ та м'яких, розпушених ґрунтів з $z/D > 0,05$. Різні емпіричні залежності теж можна розділити на 2 групи – використання для розрахунку площі плями контакту а) характеристик шини (типорозміру), тиску повітря в шині та навантаження на колесо і б) радіусу колеса, глибини колії і радіальної деформації шини. З аналізу публікацій слід виділити (по групі а)) дисертаційну роботу Dr. - Ing. M Steiner [9], де розглянуто ґрунт середньої щільності та вологі (5-7), але розділено залежності для радіальних (9) та діагональних (8) шин на твердій площині (що актуально для сучасної практики в Україні й крім цього залежності (1)-(4) базуються на застосуванні діагональних шин):

$$\text{- для повнопрофільних шин - } F_k = (0,260BD) - (295,944p_k) + (0,556G_k) \quad (5)$$

$$\text{- для низькопрофільних шин } F_k = (0,416BD) - (457,670p_k) + (0,186G_k) \quad (6)$$

- для шин з всюдихідним протектором
$$F_k = (0,420BD) - (1120,680p_k) + (0,370G_k) \quad (7)$$

Розрахунки для твердої поверхні:

- діагональні шини
$$F_k = 100G_k / (1,128 + [0,665p_k] + [0,009G_k] - [0,004D]) \quad (8)$$

- радіальні шини
$$F_k = 100G_k / (2,677 + [0,575p_k] + [0,011G_k] - [0,016D]) \quad (9)$$

У дисертаційній роботі Dr.-Ing. I. Bolling [10] розрахунок площі плями контакту ґрунтується на вищезазначеній групі параметрів б), запропоновано для обох типів ґрунтів у формі наступної емпіричної залежності:

$$F_k = [r_0^2 - (r_0 - h_k)^2]^{-0,5} B \quad (10)$$

де r_0 - статичний (номінальний) радіус кочення колеса. Разом з тим слід зазначити, що у даній залежності (10) не враховується тиск повітря в шині (і його вплив на площу плями контакту), а вплив навантаження на колесо та опір деформації ґрунту (твердість) – побічно, через глибину колії, що вимагає окремого розрахунку.

Зростаючого розповсюдження, у т.ч. нормативних рекомендацій профільних міністерств ФРН, Австрії, Швейцарії і ін., набувають емпіричні залежності розрахунку площі плями контакту згідно робіт Dr. E. Diserens [11, 12 та ін.], де враховуються, окрім вищезгаданих навантаження на колесо і типорозміру шини, також й вплив зміни тиску повітря у шині:

$$F_k = (aBD) + (bp_k) + (cG_k) \quad (11)$$

де: a, b, c - емпіричні коефіцієнти оцінки взаємозв'язку площі та, відповідно, типорозміру шин, тиску повітря у шинах та навантаження на колесо. Проведені об'ємні польові випробування на суглинкових ґрунтах помірно зволоженості для 13 моделей шин 3-х типів – повно-і низькопрофільні (тут повнопрофільні – при співвідношенні висоти H до ширини профіля B шин від 0,7 до 1,0), а також так зв. ґрунтового типу (tertareifen) з співвідношенням $H/B < 0,6$, табл. 1. Окремо виділено так звану універсальну залежність – для всіх типів шин, у т.ч. невизначених, також і діагональних (в основі даного дослідження власне радіальні шини, за винятком шин типу *tertareifen* - діагональних). Експериментальна оцінка проводилась на 6 типах ґрунтів, суглинкових та супіщаних, з різним вмістом вологи, після вирощування цукрового буряка, пшениці та ріпаку, а також трав'янистого луку.

Таблиця 1 - Значення емпіричних коефіцієнтів впливу шин та навантаження щодо площі контакту за [11].

Тип шини	a	b	c
Повнопрофільні	0,260	- 205,944	0,566
Низькопрофільні	0,416	- 457,670	0,186
Ґрунтові	0,420	-1120,680	0,370
Інші, невизначені	0,428 - 650,215		0,221

Практично слід констатувати, що вищевикладена методика [11] очевидно є найбільш опрацьованою, однак щодо суглинкових ґрунтів у період весняно-польових робіт.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Очевидні відмінності у формуванні площі плями контакту шини автомобіля/трактора з твердою бетонною поверхнею та ґрунтовою поверхнею, що деформується, обумовлюють огляд та аналіз відомих вітчизняних та зарубіжних досліджень у цій сфері. Розвиток інструментарію оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту та реалії використання колісної техніки створюють передумови для оперативної оцінки питомого тиску на ґрунт, тобто і визначення площі плями контакту шин, з умов агроекології.

Відповідно сформовано першочергові задачі дослідження:

- порівняльний аналіз і оцінка існуючих вітчизняних і зарубіжних досліджень щодо розрахункового визначення площі плями контакту шини з опорною поверхнею;
- аналіз формоутворення колії і плями контакту шини на ґрунтових поверхнях, що деформуються;
- опрацювання напряму досліджень, що дозволяють враховувати фізико-механічні характеристики типів і станів ґрунтової поверхні, що впливають на формування площі плями контакту шини.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Враховуючи вітчизняні реалії парку сільськогосподарських машин та військової колісної автотехніки актуальним є насамперед оцінка відмінностей формування плями контакту діагональних та радіальних шин, різниця між якими є очевидною – табл. 1. Згідно даних західноєвропейських досліджень [12 і ін.] ця різниця (при тотожних типорозмірах шин та навантаженнях) є відчутною, (рис. 1), але розповсюдження радіальних на військових машинах та бездоріжжя стримує підвищена чутливість боковин до механічних пошкоджень. При формуванні колії боковина шини входить у безпосередній контакт – деформації ґрунту на глибину колії, що фактично формує тривимірну пляму контакту шини з опорною поверхнею, з передачею певного часткового тиску і на боковини (на відміну від звичної двовимірної плями контакту на твердих поверхнях, що не деформуються).

Вплив жорсткості боковин шин (різної у радіальних та діагональних шин ідентичного типорозміру) загальновідома і по зміні форми поперечного перерізу плями контакту при великому зниженні тиску повітря в шині і виділенню найнижчих ліній деформації ґрунту по боковинах, на відміну від центральної при номінальному тиску в шині.

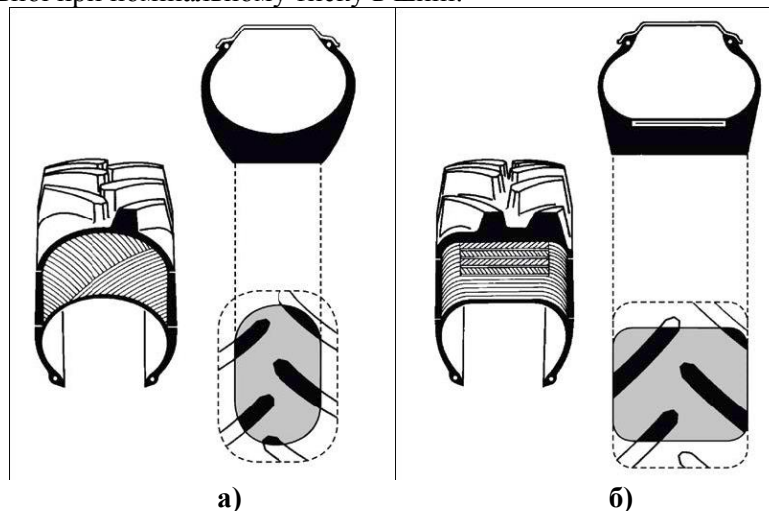


Рисунок 1 - Формування плями контакту на м'якому ґрунті діагональної (а) та радіальної (б) шин [17]

У класичній теорії автомобіля [6, 10 і ін.] рух шини деформованою поверхнею з утворенням колії окрім звичного зчеплення і опору коченню шини внаслідок її деформації і гістерезисних втрат у самій шині $f_{ш}$ та деформації опорної поверхні з колією певної глибини f_z додатково враховується (рис. 2.):

- опір зміщенню ґрунту (піску) від зсуву вперед (т. зв. бульдозерний ефект) f_6 ;
- опір (додаткова затрата енергії) внаслідок пробуксовування ведучого колеса і додаткового заглиблення в опорну поверхню та переміщення частини ґрунту (піску) із зони контакту у напрямку обертання колеса (т. зв. екскаційний ефект) f_8 ;
- опір горизонтальному зміщенню верхньої частини опорної поверхні, еквівалентної поперечній площині колії, що утворюється внаслідок руху колеса (т. зв. тиск відпаду) f_5 ;
- для зв'язних опорних поверхонь також додатковий опір коченню колеса внаслідок прилипання частинок ґрунту до шини f_n .

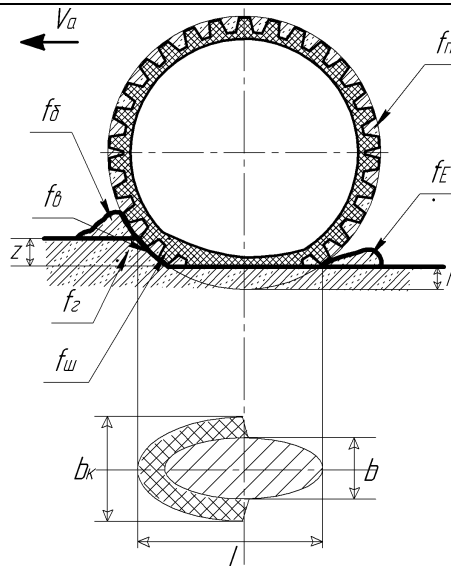


Рисунок 2 - Розрахункова схема взаємодії колеса з ґрунтом та формування плями контакту [6, 10]

Очевидно, що принаймні у більшості цих ефектів є контакт шини з ґрунтом, зокрема і боковин, що видозмінює площу контакту у порівнянні з фактично плоскою на твердій опорній поверхні – лінія b_k бічного розширення колії (рис. 2), що особливо характерно для діагональних шин, розповсюджених на техніці для бездоріжжя (контурна лінія плями контакту, рис.1). Зрештою бічну деформацію – ущільнення ґрунту засвідчують і польові дослідження – розподіл ізоліній деформацій вбік стінок колії (рис. 3) [13] та корегувальні коефіцієнти збільшення площі плями контакту на твердій поверхні при розповсюджених спрощених визначеннях питомого тиску на ґрунт [5-10].



Рисунок 3 - Зміщення ліній деформації ґрунту навколо колії від колеса [18]

Практично слід констатувати тривимірний, об'ємний характер контакту шини у колії, звично з різним розподілом питомого тиску на ґрунт по боковинах і основі плями, але і не коректністю зведення навантаження на колесо тільки до горизонтальної площадки – основи плями. Оцінка площі об'ємного контакту, однак, є проблемною і фактично не досліджуваною. Спроба використання для заміру площі контакту цифрової фотокамери з програмним забезпеченням Software Adobe Photoshop, що дозволяє розрахувати площу у метричній системі (12), теж обмежена фактично двомірним зображенням і знову ж таки побудована на експерименті [14]:

$$KF = \left[\frac{\left[\frac{H_{pix} * B_{cm}}{B_{pix}} \right] B_{cm}}{N_{pixkam}} \right] * N_{pixpolygon} \quad (12)$$

де: KF - площа контакту, см^2 , H_{pix} - довжина, піксель; B_{pix} - ширина, піксель; B_{cm} - ширина, см ; N_{pixkam} - піксель камери, $N_{pixpolygon}$ - кількість піксель полігон.

Важливим аспектом розрахункового визначення площі плями контакту є також врахування характеристик ґрунту. Оперативна оцінка стану ґрунту (і відповідно пов'язаних з цим емпіричних залежностей розрахунку показників руху колісних і гусеничних машин) краще опрацьована у дослідженнях з військовою технікою, так зв. WES – методикою армії США, що бере свій початок ще з 2-ї світової війни та покладена в основу нормативної бази армій НАТО і інших країн [15, 16 і ін.]. В основу оцінки ґрунту/піску як опорної поверхні покладено комбінований показник твердості – так зв. конусний індекс CI (cone index), що поєднує оцінку вертикальної деформації та зсуву вбік, характерних для взаємодії колеса з ґрунтовою поверхнею, що деформується. Оперативна оцінка стану ґрунту базується на використанні стандартизованого пенетрометра з відповідним конусним наконечником [17]. Звично, що твердість ґрунту і його щільність, що фігурує у нормативній базі [3-5], є різними параметрами, однак твердість, на відміну від щільності, можна визначити миттєво і використовувати для оцінки технологій механічного обробітку землі (згідно дослідження акад. Медведєва В.В. [18]) і вже використовується в агроекологічній оцінці сільськогосподарських угідь [19 і ін.]. Окрім цього з механіки ґрунтів очевидний взаємозв'язок обидвох параметрів, що для кожного з типів ґрунтів може бути визначений у формі певної кореляційної залежності [20] та дозволяє побічно і оцінити вологість ґрунту (від якої залежить і твердість).

У військовій WES-методиці відсутня методика прямого розрахунку – визначення площі плями контакту на ґрунтових/піщаних поверхнях, чітко визначена процедура статичної її оцінки на бетонній поверхні, що фігурує надалі у поєднанні з показником твердості – конусним індексом CI у опрацьованих емпіричних залежностях розрахунку динаміки і енергетики руху, що є актуальним і для аграрної та інших сфер використання самохідної техніки. Слід також зауважити, що значення CI прив'язане до чітко регламентованої форми конусного наконечника пенетрометра і темпу його вдавлювання в ґрунт [16, 17], на відміну від різних форм наконечників пенетрометрів, уже наявних і в аграрній сфері [19]. Всі параметри типорозміру шини та навантаження і, відповідний радіальний прогин – деформація (при заданому тиску повітря в шині), що і формують площу плями контакту шини з твердою поверхнею у суміщенні з значенням CI (твердості ґрунту) фігурують у WES – методиці з визначення так зв. індексу мобільності машин MN (mobility number/index), однак безпосередньо розрахункове визначення площі плями контакту на конкретному бездоріжжі не опрацьовувалось. Разом з тим методологія WES створює передумови для опрацювання даного питання з врахуванням фактичного стану ґрунту, а саме його твердості.

Окремого, детальнішого дослідження потребує і оцінка площі плями контакту здвоєних шин, що власне з умов агроекології часто використовуються як засіб зменшення ущільнення ґрунту [21 і ін.]. Крім цього, на формування плями контакту здвоєних шин впливає міжколісна відстань (утворення міжколісних буртів колій), однак площа плями контакту не збільшується лінійно вдвічі – додаткова маса другого колеса та зменшення вдвічі навантаження на кожне з коліс поряд з, як правило, зміною тиску повітря у здвоєних шинах обумовлюють необхідність окремого дослідження формоутворення [21, 22].

Зміна тиску повітря в шинах теж не має лінійного впливу на формування площі плями контакту, зрештою як і на розподіл тиску у зоні контакту колеса з ґрунтом [23], що ще донедавна (і досі у багатьох підручниках) визначався як збільшений у 1,3-1,5 тиск повітря у шинах. Зміна плями контакту залежно від тиску повітря в шинах має нелінійний характер і пов'язана, окрім навантаження на колесо і типорозміру шин, також і з твердістю опорної поверхні – ґрунту.

Найбільш опрацьованою методикою оцінки питомого тиску у контактній шині з ґрунтом з умов агроекології (а відповідно і розрахунку площі плями контакту), як показує проведений огляд та аналіз публікацій, є швейцарсько-данська комп'ютеризована програма розрахунку Terranimo [24], що

базується і на вищезгаданому дослідженні Е. Diserens [11] та враховує і твердість ґрунту (з прив'язкою щодо питомого вмісту глини і вологи). Допустимість/шкідливість конкретного значення тиску у контакті оцінюється двопараметровою діаграмою „твердість ґрунту – питомий тиск у контакті”. Однак програма опрацьована фактично для типових для Данії суглинків з вмістом глини 5-18% та діапазону вологості, характерного для даної кліматичної зони.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проведений огляд вітчизняних і західноєвропейських методик розрахунку площі плями контакту дозволяє констатувати практичну відсутність методики розрахунку на поверхнях, що деформуються, з врахуванням конкретного стану і типу ґрунтів. Основою такої методики доцільно формувати на базі WES – методики, де на відміну від досліджень у аграрній сфері, найбільш детально опрацьована оперативна оцінка фізико-механічних характеристик ґрунту – твердості (конусного індексу CI), на базі якої сформовано емпіричні залежності динаміки та енергетики руху, а також деформації ґрунту – глибина колії, тобто і значення тиску у зоні контакті шини з дорогою, що формується у т.ч. також площею плями контакту. Очевидність збільшення площі плями контакту відповідно до зменшення твердості ґрунту (у порівнянні з бетонною поверхнею, що домінує в існуючих методиках і нормативних актах) обумовлює доцільність проведення окремого експериментального дослідження, принаймні для 4-5 основних типів орних земель України з різним вмістом вологи і значень твердості, що дозволило б отримати відповідні кореляційні залежності приросту площі контакту відповідно зменшенню твердості ґрунту.

ВИСНОВКИ

1. Існуючі загальноприйняті методики розрахунку площі плями контакту шини автомобіля з опорною поверхнею базуються, як у вітчизняних так і зарубіжних дослідженнях, на деформації шини під заданим навантаженням на бетонній поверхні. Зміна площі плями контакту на грантових поверхнях, що деформуються, залежить від типу і стану ґрунту, насамперед вмісту вологи. Очевидно, що і величина тиску у контакті шини з даним конкретним станом ґрунту зменшується у порівнянні з розрахунковою щодо твердої поверхні пропорційно збільшенню площі плями контакту, що набуває об'ємної форми з виразно нерівномірним розподілом навантаження.

2. Для розрахунку близького до реального навантаження (питомого тиску) у контакті шини з ґрунтом, що деформується, для визначення площі контакту повинно враховувати твердість ґрунту, найбільш опрацьованим комплексним показником якої (з врахуванням опору зсуву, характерного для взаємодії шини з опорною поверхнею) є так зв. конусний індекс CI (cone index), стандартизований у методології армій НАТО (WES – методика армії США щодо оцінки прохідності та мобільності руху). Останній, окрім опрацьованих емпіричних залежностей динаміки руху автомобіля/трактора, дозволяє здійснити і непряму оцінку вмісту вологи у ґрунті. Звично, що це вимагає додаткових цільових досліджень кореляції твердості і вологості для основних типів ґрунтів, однак дозволяє уникнути складної процедури оцінки вмісту вологи в ґрунті.

3. З аналізу існуючих методик розрахунку площі плями контакту шин з твердою опорною поверхнею, беручи до уваги, що емпірика вітчизняної методики базується на діагональних шинах, контур контакту яких дещо відрізняється від зараз домінуючих радіальних шин (рис. 1), можна рекомендувати методику Е. Diserens (11), що є домінуючою у дослідженнях (і нормативних рекомендаціях) в країнах ЄС.

4. Беручи до уваги сучасний розвиток вимірювальної техніки і реалії її розповсюдження в аграрній та військовій сферах України є необхідність прийняття в Україні як ДСТУ – ISO 22476 [22]. Окрім цього експериментальні дослідження та розвиток, внесення змін в існуючу нормативну базу [3 - 5] з деталізацією процедури визначення площі плями контакту шини на різних, базових типах ґрунтів з оперативною оцінкою твердості – конусного індексу CI та відповідними даними щодо гранично допустимих значень тиску у контакті шини з ґрунтом з умов агроєкології.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Медведєв В.В. Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-тракторних агрегатів. *Вісник аграрної науки*. Київ, 2012. № 10. С. 39-45.
2. Ребров О.Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях»*. Харків, 2018. № 27. С. 110–116.
3. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. [Чинний від 2007-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 8с.

4. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2008. 10с.
5. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. [Чинний від 2006-06-01]. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України. 2005. 10 с.
6. Кальченко Б.І., Ребров О.Ю., Кожушко А.П., Мамонтов А.Г., Якунін М.Є. Динаміка руху колісних тракторів: монографія. Харків: Вид. В.А. Мірошніченко, 2021. 320 с.
7. Надикто В.Т. Проблеми баластування колісних тракторів. *Техніка і технології в АПК*, № 2, 2013. С. 7–9.
8. Болдовський В.М. Оцінка впливу рушіїв колісних тягово-транспортних засобів на ґрунт / Дис. канд. техн. наук: спец. – 05.22.02 "Автомобілі та трактори" – Харків, ХНАДУ, 2011–171 с.
9. Steiner M. Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik. 33. 1979. Dissertation, Muenchen. 178 s.
10. Bolling I. Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. 133. 1987. Dissertation, Muenchen. 174 s.
11. Diserens E. Ermittlung der Reifen-Kontaktflaechen im Feld mittels Rechenmodell. *FAT Berichte*, Schweiz. 2002. Nr. 613. S. 1–16.
12. Brunotte J., Brandhuber R., Vorderbruegge T., Schrader S. Gute fachliches Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. *Bundesanstalt fuer Landwirtschaft und Ernaehrung*, Berlin. 2018. 62 s.
13. Moitzi G. Bodenverdichtung im Pflanzenbau. Biogas Spezialberaterfortbildung. Unversitaet fuer Bodenkultur Wien. 2010. 46 s.
14. Schwieger H. Untersuchung neuartiger Laufwerke und lasergestuezte Erfassung der Reifen-/Bodenfermormung / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. Dissertation, Kiel. 181, 1996. 162 s.
15. Wong Y.J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. Butterworth. London. 2010. 482 p.
16. Грубель М.Г., Крайник Л.В. Прохідність військових автомобілів: монографія. Київ: Професіонал, 2023. 182 с.
17. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. First edition. 2012-09-15.
18. Медведєв В.В. Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку. *Вісник аграрної науки*, № 4, 2010. С. 14–18.
19. Іванишин В.В., Рудь А.В., Мошенко І.О. Визначення переущільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. Подільський ДАТУ, 2017. Вип. 27. С. 146–158.
20. Медведєв В.В., Лындина Т.Е., Лактионова Т.Н. Плотность сложения почв. Харків: 13 типографія, 2004. 243с.
21. Ребров О.Ю. Аналіз ефективності здвоювання тракторних шин. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського*. Серія: технічні науки. Том 30 (69), ч.2, № 5, 2019. С. 18–22.
22. Галич І.В., Антощенков Р.В., Антощенков В.М., Дюндик С.М., Жарко Ю.Г. Динаміка одинарних та здвоєних колісних систем трактора у вертикальному напрямку. *Інженерія природокористування*, 2020, №4(18), с. 14–23
23. Hoeltkemeyer V. Messen der Reifenverformung bei verschiedenen Radlasten und Luftdruecken / *Landtechnik*, No 2 (60), 2005. S. 76–77.
24. Diserens E., Spiess E. TASC-eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. *Agrarforschung* 12 (1), 2005, S. 22–29.

REFERENCES

1. Medvediev, V.V. (2012). Ekolohizatsiia v konstruiuvanni ta ekspluatatsii zemlerobskykh mashynno-traktornykh ahrehativ. *Visnyk ahrarnoi nauky*. Kyiv, № 10. 39–45.
2. Rebrov, O.Iu. (2018). Rozpodil dopustymoho tysku na grunt khodovykh system kolisnykh traktoriv za terytoriiu Ukrainy. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriiia «Matematychnye modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh». Kharkiv, № 27. 110-116.

3. DSTU 4521:2006. (2007-07-01). Tekhnika silskohospodarska mobilna. Normy dii khodovykh system na grunt.. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 8s.
4. DSTU 4977:2008. (2009-01-01). Tekhnika silskohospodarska mobilna. Metody vyznachennia maksimalnogo napruzhenia v grunti pid diieiu khodovykh system.. Vyd. ofits. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 10s.
5. DSTU 4977:2008. (2009-01-01). Tekhnika silskohospodarska mobilna. Metody vyznachennia maksimalnogo napruzhenia v grunti pid diieiu khodovykh system.. Vyd. ofits. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 10s.
6. Kalchenko, B.I., Rebrov, O.Iu., Kozhushko, A.P., Mamontov, A.H. & Yakunin M.Ie. (2021). Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv: monohrafiia. Kharkiv: Vyd. V.A. Miroshnichenko, 320.
7. Nadykto, V.T. (2013). Problemy balastuvannia kolisnykh traktoriv. *Tekhnika i tekhnologii v APK*, № 2, 7–9.
8. Boldovskiy, V.M (2011). Otsinka vplyvu rushiiv kolisnykh tiahovo-transportnykh zasobiv na hrunt. Dys. kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.02 "Avtomobili ta traktory" Kharkiv, KhNADU, 171.
9. Steiner, M. (1979). Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik. 33. Dissertation, Muenchen. 178.
10. Bolling, I. (1987) Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. 133. 1987. Dissertation, Muenchen, 174.
11. Diserens, E. (2002). Ermittlung der Reifen-Kontaktflächen im Feld mittels Rechenmodell. FAT Berichte, Schweiz. Nr. 613. 1–16.
12. Brunotte, J., Brandhuber, R., Vorderbruegge, T. & Schrader, S. (2018). Gute fachliches Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bundesanstalt fuer Landwirtschaft und Ernaehrung, Berlin. 62 s.
13. Moitzi, G (2010). Bodenverdichtung im Pflanzenbau. Biogas Spezialberaterfortbildung. Unversitaet fuer Bodenkultur Wien, 46.
14. Schwieger, H. (1996). Untersuchung neuartiger Laufwerke und lasergestuezte Erfassung der Reifen-/Bodenfermormung / Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. Dissertation, Kiel. 181, 162.
15. Wong, Y.J. (2010). Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. Butterworth. London, 482.
16. Hrubel, M.H. & Kraynyk, L.V. (2023). Prokhidnist viiskovykh avtomobiliv: monohrafiia. Kyiv: Profesional, 182.
17. ISO 22476-1:2012. (2012-09-15). Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. First edition.
18. Medvediev, V.V. (2010). Tverdist gruntu yak kryterii dlia obgruntuvannia tekhnologii tekhnichnykh zasobiv z yoho obrobitku. *Visnyk ahrarnoi nauky*, № 4, 14–18.
19. Ivanyshyn, V.V., Rud, A.V. & Moshenko, I.O. (2017). Vyznachennia pereushchilnennia gruntiv u hospodarstvakh zakhidnoi chastyny lisostepu Ukrainy. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika*. Podilskyi DATU. Vyp. 27, 146–158.
20. Medvedev, V.V., Lyindina, T.E. & Laktionova, T.N. (2004). Plotnost slozheniya pochv. Harkiv:13 tipografiya, 243.
21. Rebrov, O.Iu. (2019). Analiz efektyvnosti zdvoiuivannia traktornykh shyn. *Vcheni zapysky TNU im. V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky*. Tom 30 (69), ch.2, № 5, 18–22.
22. Halych, I.V., Antoshchenkov, R.V., Antoshchenkov, V.M., Diundyk, S.M. & Zharko, Yu.H. (2020). Dynamika odyarnykh ta zdvoienykh kolisnykh system traktora u vertykalnomu napriamku. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, №4(18), 14–23.
23. Hoeltkemeyer, V. (2005). Messen der Reifenverformung bei verschiedenen Radlasten und Luftdruecken / Landtechnik, No 2 (60), 76–77.
24. Diserens, E., Spiess, E. (2005): TASC-eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. *Agrarforschung* 12 (1), 2005, 22–29.

Syvulka P.M., Sukach O.M. Assessment of tire contact spot area on soil surfaces

The article presents a comparative analysis of known methods for calculating the contact patch of a pneumatic tire of wheeled vehicles and develops proposals for the conditions of interaction with deformable support surfaces. The classical assessment-calculation of the area of the contact patch of a tire with a support

surface is based on a hard concrete surface - a 1 class road. However, in the agricultural and military sectors, soil surfaces dominate, which changes the contact area. A comparative analysis of the known 3 main methods for calculating the area of the contact patch is carried out - national (introduced in 1972) for general-purpose vehicles, European in the agricultural sector and WES - the method of NATO troops.

To take into account the change in the area of the tire contact patch on surfaces that deform with a significant variety of types and physical and mechanical characteristics, it is proposed to use the standard in the WES method - the indicator of soil hardness as a wheel support surface - the cone index CI (cone index), which is used for operational assessment of the patency and mobility of off-road vehicles. In addition to the load on the wheel, a significant role in the formation of the contact patch is played by the change in air pressure in the tire, which is also taken into account on the basis of generalized data on the corresponding change in the radial deformation of the tire.

Clarification of the change in the area of the tire contact patch for specific types and conditions of soils allows for a more correct agroecological assessment of wheeled tractors and vehicles in specific driving conditions.

Keywords: soil compaction, car, tractor, wheel, contact patch, specific pressure, soil hardness.

СИВУЛЬКА Петро Михайлович, аспірант, Львівський національний університет природокористування, e-mail: petr1111@i.ua.

СУКАЧ Олег Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Автомобілів і тракторів», Львівський національний університет природокористування, e-mail: 19oleg85@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0867-335X>.

Petro SYVULKA, PhD student, Lviv national environmental university, e-mail: petr1111@i.ua.

Oleh SUKACH, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of automobiles and tractors, Lviv national environmental university, e-mail: 19oleg85@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0867-335X>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1747