

АГРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТИВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ: ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ТА СУЧАСНІ ПІДХОДИ УДОСКОНАЛЕННЯ

Л.В. Крайник, П.М. Сивулька

Львівський національний університет природокористування

(м. Дубляни, Львівська обл., Україна)

e-mail: l.kraynyk@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0524-9126

e-mail: petr1111@gmail.com; ORCID: 0009-0009-0254-4064

Проведено порівняльний аналіз нормативних баз та методик оцінки тракторів та автомобілів за умов агроекології в Україні та ЄС (на прикладі ФРН). Показано неоднозначність агроекологічної оцінки тільки на основі питомого тиску у контакті шини з ґрунтом, що регламентовано ДСТУ 4521:2006. Зокрема за однакових значень питомого тиску шини більшого типорозміру (і за відповідно більшого навантаження на колесо) спричиняють значно більшу глибину та периметр ущільнення ґрунту. Діапазон допустимих значень питомого тиску є 4-кратним і залежним не тільки від пір року і відповідних варіантів щільності ґрунту, але також і від 5 рівнів вмісту вологи. Нормативний інструментарій визначення щільності та вмісту вологи (ін. ДСТУ) передбачає тривалі лабораторні оцінки і не враховує розвиток засобів оперативної оцінки, що набули розповсюдження впродовж останніх 30–40 років. Проблемною є і оцінка колісних тракторів класу тяги 3 і вище з різними типорозмірами шин передньої та задньої осей та різним навантаженням на осі, що набувають дедалі більшого розповсюдження. Розглянуто питання використання твердості ґрунту, що пов'язана з щільністю та вмістом вологи, як оперативного показника стану ґрунту та уточнення розрахунку площі плями контакту шин з опорною поверхнею. В основу інструментарію оцінки запропоновано застосування п'єзоелектричних пенетрометрів, однак зі стандартизованим конусним наконечником під визначення т. зв. «конусного індексу CI» (cone index) та прийняття відповідного стандарту ISO як національного ДСТУ, що актуально і для інших сфер діяльності. Опрацьовано пропозиції щодо розвитку і осучаснення відповідної нормативної бази агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів зі врахуванням розвитку інструментарію оперативного оцінювання стану ґрунту та зміни площі плями контакту шин залежно від твердості ґрунту та тиску повітря в шинах і навантаження на осі.

Ключові слова: трактори, автомобілі, ущільнення ґрунту, нормативна база, інструментарій оцінки, питомий тиск, оновлення.

ВСТУП

Проблема переущільнення сільськогосподарських угідь із ростом продуктивності, а, відповідно, і ваги машинно-тракторних агрегатів та збільшення навантаження у контакті шин зі ґрунтом особливо загострилась із початком масового використання колісних тракторів класу 3,0–6,0 та належного причіпного і навісного обладнання. З появою за часів СРСР важких тракторів Т 150К та К 700/701 класів 3–5 у 1980-х роках та завдяки участі українських вчених

(акад. В.В. Медведєв та ін.) було прийнято три державні стандарти (ГОСТ), що визначали нормативну базу щодо вимог та агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів (МТА), що у 2005–2008 рр. лягли в основу національних стандартів ДСТУ [1–3]. Розвиток вимірювальної техніки й оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту та досліджень у цій сфері за останні практично 40 років з моменту формування цих ГОСТ/ДСТУ, а також відповідна нормативна практика у країнах ЄС і США обумовлює необхідність і еквівалентного

оновлення і вітчизняної нормативної бази, актуальність якої є очевидною [4; 5].

Метою цього дослідження — обґрунтувати та проаналізувати сучасні методики агроекологічної оцінки МТА в ЄС і США, а також опрацювати пропозиції щодо оперативного оцінювання оновлення вітчизняної нормативної бази.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Реалії розвитку зумовлюють необхідність оновлення нормативної бази щодо декількох аспектів. Насамперед це стосується виключного використання питомого тиску у контакті шини з ґрунтом, як єдиного показника агроекологічності конструкцій. Дослідження в Європі ще з початку 1950-х років (проф. W. Soehne) засвідчили, що за однакового значення питомого тиску в контакті — глибина і ширина розповсюдження деформації ґрунту (т. зв. «груші») істотно різняться залежно від навантаження на колесо та відповідного типорозміру шини (рис. 1) [6]. За сучасного збільшення

навантаження на колесо до 3-х і більше тонн глибина деформації ґрунту перевищує 1 м, ширина «груші» — понад 0,7 м (Dr. I.H. Volting) [7]. Відповідно за однакового значення питомого тиску у контакті з ґрунтом, але різних навантаженнях і відповідно різних типорозмірах коліс, об'єм деформації — ущільнення ґрунту буде істотно відрізнятися, що не дає підстави трактувати величину питомого тиску у контакті як єдиного і комплексного показника ущільнення ґрунту. Це підтверджується й існуючою практикою агроекологічної оцінки МТА в ЄС (J. Brunotte, R. Brandhuber) [8; 9 та ін.]. Окрім того, вона базується на оперативній оцінці фізико-механічних характеристик ґрунту за допомогою сучасних приладів вимірювання, у той час як вітчизняна нормативна база [1–3] для двох пір року (весна, осінь/літо) і відповідно різних значень щільності ґрунту визначає допустимі значення питомого тиску у досить широкому діапазоні від 40 до 210 кПа для 5 рівнів вмісту вологи і 4 рівнів щільності ґрунту, оцінка чого ґрунтується нормативно

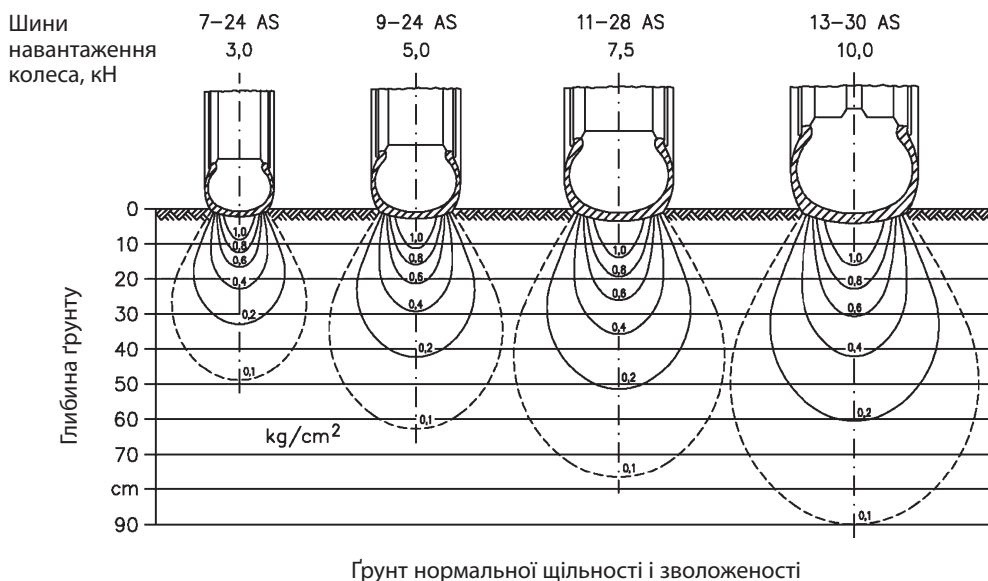


Рис. 1. Залежність навантаження на ґрунт (kg/cm^2) за однакового тиску у контакті шини з ОП від розмірності шин (7-24S ...13-30S) та відповідного навантаження на шину (3,0...10,0 kN) згідно з [6]

(згідно інших ДСТУ) на засобах і методах великою мірою трудомістких і тривалих.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В основу покладено аналіз розвитку агроєкологічної оцінки техніки в Україні та країнах ЄС, а також оцінювання можливості використання твердості ґрунту як базового показника стану ґрунту з умов оперативності експертизи та сучасного розвитку засобів вимірювальної техніки.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Сучасний розвиток засобів оперативної оцінки характеристик ґрунту докорінно змінює трудомісткість і тривалість процесу, де домінували лабораторні методи, складні для застосування у конкретних господарствах. Нормативна оцінка щільності (метод Качинського, ДСТУ 4745:2007) чи твердості ґрунту (твердомір Ревякіна, ДСТУ 5096:2008) зазвичай не використовується в ЄС і США, де віддавна, спочатку у військовій сфері [10; 11 та ін.], а наразі вже і у вітчизняних дослідженнях та на практиці в аграріїв [12] домінують пенетрометри з конусними чи циліндричними наконечниками згідно зі стандартом ISO [13] (до речі, нещодавно ухваленого і в РФ як ГОСТ-Р). Власне виробництво пенетрометрів налагоджено вже і в Україні, хоча деякі виробники визначають їх як щільномір (одиниці виміру однак у $\text{кг}/\text{см}^2$), а фактично це твердоміри. Крім того, з механіки ґрунтів очевидний кореляційний зв'язок обох параметрів (рис. 2) [14; 15].

Актуальність використання твердості ґрунту, як оперативного оціночного показника фізико-механічного стану, що практично пов'язаний зі вмістом вологи, визначено ще в 2010 р. акад. УААН В.В. Медведєвим, одним з основоположників сучасного вітчизняного ґрунтознавства [16]. До того ж звернуто увагу і на недоречність використання для оцінки твердості твердоміра Ревякіна, закладеного і у вітчизняну нормативну базу [17], через невідповідність просторової геометрії і, відповідно, опору деформації ґрунту

реаліям взаємодії з колесами/гусеницями МТА, та доцільність сучасних пенетрометрів з конусним наконечником. Останні уже набули розповсюдження у вітчизняних дослідженнях [18]. Оперативна оцінка щільності ґрунту є значно складнішою і, як правило, не є прив'язаною до емпіричних залежностей опору руху та інших характеристик взаємодії колісних машин із бездоріжжям. Враховуючи, що власне у військовій сфері значно краще (порівняно з аграрним чи лісгосподарським секторами) опрацьовано теорію руху колісних і гусеничних машин бездоріжжям — т. зв. WES — методику інженерного корпусу армії США, що бере свій початок з 1940-х років і покладена в основу відповідних методик та стандартів не тільки в НАТО, але й у багатьох зарубіжних арміях [10; 11]. Логічно і в основу аналітичних досліджень агроєкологічності МТА адаптувати відповідні напрацювання. Оцінка твердості ґрунту у цій методиці чітко регламентована — геометрія конусного наконечника, що близька до комбінації вертикальної деформації та зсуву ґрунту, характерної для взаємодії колеса з опорною поверхнею — та відповідного показника твердості, т. зв. конусного індексу CI (cone index), на базі якого і опрацьовано комплекс емпіричних залежностей, необхідних для розрахунку та імітаційного моделювання руху та взаємодії колеса з бездоріжжям (що загалом

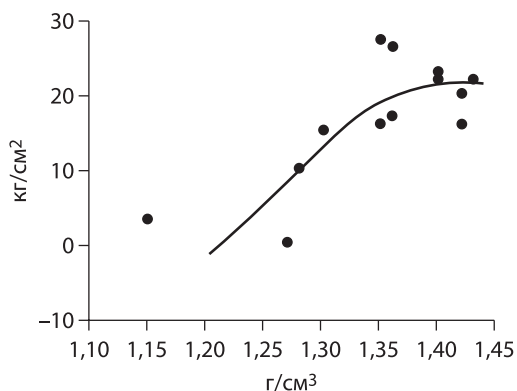


Рис. 2. Залежність між щільністю ($\text{г}/\text{см}^3$) та твердістю ($\text{кг}/\text{см}^2$) ґрунту [14; 15]

не проаналізовано так детально в аграрній сфері).

Для практичного використання і оцінки деформації/ущільнення ґрунту першочерговим є визначення площі (плями) контакту шини з ОП. У нормативній базі [3] передбачено експериментальне встановлення площі контакту шини з твердою (бетонною) опорною поверхнею зі збільшенням у 1,6–1,1 рази залежно від статичного діаметру шин (у зворотній пропорції до величини колеса) та донавантаженням маси трактора відповідно до максимальної вантажопідймальності механізму навіски або розрахункової маси імітування тягового зусилля, якщо вона є більшою. Звично, що у реаліях аграрних господарств складно уявити усю цю досить трудомістку процедуру, зокрема з розміщенням додаткового баласту по осі задніх шарнірів нижніх тяг механізму навіски. Водночас недостатньо враховується вагомий чинник впливу на формування площі контакту — зміна тиску повітря в шинах (необхідна додаткова серія замірів), різних співвідношень ширини і висоти профілю шин (різний об'єм стиснутого повітря), зрештою твердість/вміст вологи конкретного типу ґрунту. Крім того, задня вісь колісного трактора, що переважно має більше навантаження і більший діаметр коліс (зокрема у зарубіжних тракторах класів 3–6), часто є в одній колії з передньою віссю, що формує додаткове ущільнення ґрунту, яке не враховано у [3].

У наших дослідженнях найбільш досконалою і деталізованою розрахунковою залежністю визначення площі плями контакту (розвиток класичної простішої схеми) є методика НТУ «ХП» [19]:

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

де a_k — велика напіввісь еліпса — довжина плями контакту; b_k — мала піввісь — ширина на плями контакту.

Передусім (за статистичними даними шин) останні можуть бути визначені як:

$$\begin{aligned} a_k &= c_3 \sqrt{D f_t - f_t^2}; \\ b_k &= 2 \sqrt{2 R_{pr} f_t - f_t^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де D — статичний діаметр колеса (без навантаження); f_t — прогин шини під дією радіального навантаження на колесо, внутрішнього тиску повітря в шині та врахування ще 3-х постійних для даної шини коефіцієнтів; R_{pr} — шини; c_3 — коефіцієнт, що залежить від розміру шини та норми шаруватості, ще додатково 4 емпіричні формули [19].

Однак слід зазначити складність використання даної залежності у практиці аграріїв, зокрема і пошуку значень 3-х емпіричних коефіцієнтів щодо різних типорозмірів шин, що не надаються виробниками і вимагають окремої оцінки.

В європейській практиці домінують менш складні розрахункові методи визначення площі плями контакту шин, зокрема на ґрунтових поверхнях, що деформуються. Істотною відмінністю є насамперед акцент на радіальні шини, що мало досліджувались на пострадянських теренах і характерні дещо іншою формою і площею контакту порівняно з ще донедавна звичними діагональними. Втім на базі розширених польових досліджень опрацьовані кореляційні залежності, що враховують вплив на площу плями контакту шини з ґрунтом типорозміру шин, навантаження на колесо, а також зміну тиску повітря в шині. Найпоширенішою (і ухваленою у певних нормативних рекомендаціях) є формула Dr. E. Diserens [20], що систематизована як для діагональних (тут т. зв. ґрунтові), так і для радіальних шин, що наразі превалюють в автомобілях і тракторах, та враховує вищезгадані чинники впливу на основі емпірично визначених коефіцієнтів регресії:

$$F_k = (aBD) + (bp_k) + (cG_k), \quad (3)$$

де G_k — навантаження на шину (Н); p_k — тиск повітря у шині (кПа, бар); a , b , c — ширина шини (мм); емпіричні коефіцієнти оцінки взаємозв'язку площі та, відповідно, типорозміру шин, тиску повітря у шинах та навантаження на колесо (табл. 1).

Загалом формула (3) домінує як у наукових дослідженнях з агроекології [21; 22 та ін.], так і в офіційних нормативних рекомендаціях [23].

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів типорозміру шин щодо площі контакту [20]

Тип шини	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Повнопрофільні	0,260	–205,944	0,566
Низькопрофільні	0,416	–457,670	0,186
Грунтові	0,420	–1120,680	0,370
Інші, невизначені	0,428	–650,215	0,221

Крім того, у низці досліджень починають використовувати і безпосередній замір площі контакту цифровими фотокамерами з розрахунком площі у вбудованому програмному забезпеченні Software Adobe Photoshop (7.0) [24].

Однак ця процедура досить трудомістка (заїзд трактора/автомобіля на поле і виважування та опускання коліс над цільним ґрунтом, застосування контрастного барвника на шині, дублювання дослідів), утім фактично тривимірну, об'ємну площу плями контакту за утворення колії фотоапарат фіксує у двомірній площині та відповідну площу.

Розрахунок середнього ефективного тиску у контакті шини з ґрунтом, як показника впливу МТА з умов агроєкології, також відрізняється від ухваленого з часів СРСР у вітчизняній практиці [3] і базується на формулі Newmark-Sohne [25; 26]:

$$\delta_k = \delta_o \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r}{z} \right)^2 + 1}} \right]^{vk}, \quad (4)$$

де δ_o – тиск безпосередньо у контакті шини з ОП, кПа; r – еквівалентний радіус площі контакту шини з ОП, см; z – глибина колії; vk – чинник концентрації. Значення останнього коливається у діапазоні від 2 до 9 залежно від типу ґрунту і вмісту вологи зі зростанням значення для м'яких ґрунтів зі зменшенням розповсюдження тиску в глибину (т. зв. ґрушті деформації ґрунту під зоною контакту шини з ОП). Переважно $vk = 5$ для м'яких ґрунтів інтенсивного землеробства, $vk = 4$ для твердішого ґрунту з меншою інтенсивністю обробітку. Очевидно, що досить суб'єктивна оцінка

vk та необхідність додаткового розрахунку глибини колії z і еквівалентного радіуса плями контакту r (що відрізняється від статичного радіуса колеса) не є сприятливими чинниками для практичного використання аграріями.

Крім того, можна констатувати, що власне вирази (3, 4) покладені в основу найбільш розповсюдженої в ЄС методики оперативної агроєкологічної оцінки використання МТА в аграрному секторі безпроблемним доступом до відповідної комп'ютеризованої програми TASC [25; 26] в Інтернет-мережі та посиланням на неї у багатьох офіційних рекомендаціях відомчих органів державної влади [8 та ін.]. Глибина колії, що необхідно заміряти для агроєкологічної оцінки, у даному випадку є найпростішою процедурою (порівняно з визначенням щільності, вологості згідно з [1] чи твердості, як у WES-методиці [10; 11]). Щоправда воно вимагає виїзду техніки безпосередньо на конкретне поле, оцінка стану ґрунту на підставі заміру твердості пенетрометром – конусний індекс CI є простішою.

У методиці НАТО – WES інженерного корпусу армії США безпосереднє виявлення плями відсутнє, але воно фігурує за визначення показника прохідності т. зв. індексу/номеру мобільності MN (англ. – mobility number) військової автотехніки під конкретний стан ґрунту, що оцінюється показником твердості CI та типорозміром шин і навантаженням [10; 11]:

$$MN_{WES} = \frac{CI \times b \times d}{G_a} \times \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0,5} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{2d}} \right), \quad (5)$$

де CI – значення конусного індексу для даної поверхні, кПа; G_a – вага автомобіля/трактора, кН; δ – деформація шини під повним номінальним навантаженням на твердій опорній поверхні, м; d – діаметр колеса із шиною, без навантаження, м; b – ширина шини у зоні протектора, м; h – висота шини, м.

Практично у (5) враховано як твердість ґрунту CI , так навантаження та типорозмір

і деформація шин — тобто весь комплекс чинників, що формують деформацію — питомий тиск на ґрунт. Однак (5) в існуючому вигляді опрацьована під звичну військову автотехніку — з однотипною односкатною ошиновкою всіх осей та практично рівномірним розподілом навантаження по осях. Не враховується і ефект доущільнення в колії за проїзду наступних після першої осей, що також є істотним [10; 11]. Окрім уже звичних типорозмірів коліс передньої та задньої осей багатьох сучасних колісних тракторів класу тяги 3...6 (а відповідно і різних навантажень та деформацій ґрунту з врахуванням послідовності дії) в аграрній сфері необхідно враховувати і реалії істотного донавантаження задньої осі від навісного чи причіпного технологічного обладнання [3–5]. Однак власне цей комплексний підхід зведення оцінки ущільнення ґрунту під конкретне значення його твердості безумовно заслуговує уваги.

Певним чином це стосується і показника потенційної прохідності військової автотехніки — т. зв. ефективного тиску на опорну поверхню — *MMP* (англ. — Mean maximum pressure), що розроблений центром науково-дослідних робіт у сфері озброєння Великої Британії RARDE (англ. — Royal Armament Research and Development Establishment UK) [10; 11], що обробовується як:

$$MMP = \frac{k \times G_a}{2 \times n \times b^{0,85} \times d^{1,15} \times \left(\frac{\delta}{h} \right)^{0,5}}, \quad (6)$$

де k — коефіцієнт осей (табл. 2); n — кількість осей; b — ширина шини у зоні про-

філя протектора; δ/n — питома деформація шини на недеформованій твердій поверхні ($\delta/n = 0,18$ за номінального тиску у шині для номінальної маси і швидкості масових автомобілів для шосе, $\delta/n = 0,25$ за тиску 70% від номінального для повнопривідних позашляховиків із повною масою, 0,35 — аналогічно за зменшення тиску у шинах до 30% від номінального).

Практично показник потенційної прохідності *MMP*, що використовується у нормативній базі багатьох європейський армій НАТО, у поєднанні з замірами твердості конкретного ґрунту/бездоріжжя — значеннями конусного індексу *CI* дає можливість заздалегідь оцінити прохідність конкретної машини за відповідною шкалою співвідношення значень *CI* та *MMP*.

У такий спосіб цей підхід можна застосувати і для оцінки т. зв. агроекологічної прохідності МТА — в аспекті допустимості руху конкретної техніки для заміряного фізико-механічного стану (за оцінкою згідно *CI*) конкретного поля. Вираз (6) допомагає визначити питомий тиск у контакті шини з твердою поверхнею без проміжного розрахунку площі плями контакту на підставі статистичного узагальнення шин підвищеної прохідності єдиного типорозміру на всіх осях та рівномірного розподілу навантаження. Очевидно, що необхідне опрацювання і розвиток методики *MMP* під конкретну агротехніку з різними типорозмірами шин передньої та задньої осей та відповідним нерівномірним розподілом навантажень. У випадку використання формули (4), окрім попереднього встановлення площі плями та тиску на твердій поверхні, тиск на ґрунт визначається за до-

Таблиця 2. Значення коефіцієнта осей k для розрахунку *MMP* [11]

Кількість осей	Кількість ведучих осей					
	1	2	3	4	5	6
2	4,4	3,65				
3	5,25	4,35	3,9			
4	6,05	4,95	4,44	4,1		
5			4,97		4,32	
6		6,2	5,55	5,15		4,6

даткового розрахунку глибини колії, приведення радіуса плями контакту та вибору значення чинника концентрації в діапазоні значень від 2 до 9 (досить суб'єктивному). Суб'єктивності позбавлена оцінка навісної здатності ґрунту (як опорної поверхні) на базі стандартизованого конусного індексу CI , до значень якого прив'язані вже опрацьовані емпіричні залежності визначення коефіцієнтів опору руху, зчеплення шин, глибини колії — ущільнення, енергозатратності руху та ін. за WES-методикою [10; 11]. Не менш важливим є переважно лінійна залежність твердості від вологості ґрунту [16], що дає змогу для певного типу ґрунту оперативно оцінити допустимий (з 5 рівнів — у діапазоні від 40 до 120 кПа та від 80 до 210 кПа згідно з [1]) максимальний тиск на ґрунт ходових систем залежно від зафіксованого на глибині до 10 см значення твердості.

ВИСНОВКИ

Фактичне домінування на переважній частині аграрних угідь України більш ефективних колісних тракторів класів 3–6, що зумовлюють деградацію — переущільнення угідь [5] понад допустимі нормативною ба-

зою [1], наразі актуалізує проблему оперативної оцінки МТА з умов агроєкології та відповідного оновлення нормативної бази насамперед щодо методів і засобів оцінки та допуску до експлуатації. Враховуючи сучасний розвиток і практику конкретного використання інструментарію оцінки стану ґрунтів, очевидна доцільність введення у нормативну базу [1–3] показника твердості ґрунту (що побічно підтверджується і у [16]). На наш погляд — у формі т. зв. конусного індексу CI з використанням стандартизованих пенетрометрів та згідно з ДСТУ ISO 22476 [13]. (Останній є необхідним і з умов гармонізації нормативної бази ЗС України з НАТО). Очевидно необхідні додаткові дослідження щодо деталізації кореляційних залежностей між твердістю CI та щільністю і вологістю основних типів ґрунтів в Україні, насамперед чорноземів, що практично не досліджені у WES-методиці. Крім того, наочна необхідність і уточнення — диференціація допустимих значень питомого тиску у контакті шини з ґрунтом залежно від типорозміру шини (та відповідного навантаження (див. рис. 1)). Все це вимагає подальших досліджень та деталізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. (2006). [Чинний від 2007-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
2. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем. (2008). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
3. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. (2005). [Чинний від 2007-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
4. Медведєв, В. В. (2012). Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-тракторних агрегатів. *Вісник аграрної науки*, 10, 39–45.
5. Ребров, О. Ю. (2018). Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях, 27, 110–116.
6. Soehne, W. (1951). Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Raedern sowie bei der Bodenbearbeitung. *Grundlagen der Landtechnik*, 1(1), 87–94.
7. Bolling, I. H., & Soehne, W. (1982). Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. *Landtechnik*, 37(2), 54–57.
8. Brunotte, J., Brandhuber, R., Vorderbruegge, T., & Schrader, S. (2018). Vorsorge gegen Bodenverdichtungen. In: J. Brunotte (Eds.), *Bundesanstalt fuer Landwirtschaft und Ernaehrung*. URL: <https://hochwasser-grafschaft.de/wp-content/uploads/2023/04/2021-Praxis-Bodenbewirtschaftung-BiLU.pdf>.
9. Demmel, M. (2014, Juli). VDI — Richtlinie 6101. *Maschineneinsatz unter Beruecksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Boden*, 39. URL: <https://www.vdi.de>.
10. Wong, Y. J. (2010). *Terramechanics and off-road vehicle engineering*. London: Butterworth.
11. Грубель, М. Г., & Крайник, Л. В. (2023). *Проходність військових автомобілів*. Київ: Професіонал.
12. Іванишин, В. В., Рудь, А. В., & Мошенко, І. О. (2017). Визначення переущільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України.

- Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, 27, 146–158.
13. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. (2012). [First edition 2012-09-15]. URL: <https://www.iso.org/standard/57728.html>.
 14. Медведев, В. В., Лындина, Т. Е., & Лактионова, Т. Н. (2004). *Плотность сложения почв*. Харків: 13 типография.
 15. Карташов, С. Г., Городецкий, Е. Ю., Дудка, В. С., & Москалюк, А. А. (2018). Вплив оптимальної щільності ґрунту для різних сільськогосподарських культур на врожайність. *Таврійський науковий вісник*, 78, 21–26.
 16. Медведев, В. В. (2010). Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку. *Вісник аграрної науки*, 4, 14–18.
 17. ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твердоміром Ревякіна. (2008). [Чинний від 2009-03-01]. Київ. Держспоживстандарт України.
 18. Цизь, І. Є., & Голий, В. О. (2024). Результати дослідження твердості ґрунту полів ДПЕДГ «Еліта». *Сільськогосподарські машини*, 50, 25–36. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1332>.
 19. Кальченко, Б. І., Ребров, О. Ю., Кожушко, А. П., Мамонтов, А. Г., & Якунін, М. Є. (2021). *Динаміка руху колісних тракторів*. Харків: В.А. Мірошніченко.
 20. Diserens, E. (2002). *Ermittlung der Reifen-Kontaktf-laechen im Feld mittels Rechenmodell*. FAT Berichte, № 613, 1–16. Schweiz.
 21. Kutzbach, H.-D., & Boettinger, S. (2014). Reifen — Reifen/Boden — Verhalten. *Jahrbuch Agrartechnik*, 1–12. URL: <http://digibib.tu-bs.de/>.
 22. Koolen, A. J., & Kupers, H. (2012). *Agricultural Soil Mechanics*. (2nd ed.). Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, Springer-Verlag.
 23. DVWK Merkblatt 234. (1998). *Bodenverdichtung — Grundlagen fuer eine nachhaltige Landwirtschaft aus bodenkundlichen Sicht*. Bonn, Komis. Verbandvertrieb GmbH.
 24. Denker, S. (2011). *Landtechnische Methoden zur Erfassung von Bodenverdichtungen*. [Doctoral dissertation, Georg-August Universitaet, Goettingen, BRD]. PQDT Open <http://dx.doi.org/10.53846/goediss-1874>.
 25. Diserens, E., Battiato, A., & Sartori, L. (2014). Soil compaction, soil shearing and fuel consumption: TASC V3.0 — A practical tool for decision-making in farming. *Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering*, Zürich.
 26. Diserens, E., & Spiess, E. (2005). TASC — eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. *Agrarforschung*, 12(1), 22–29.

Стаття надійшла до редакції журналу 01.08.2025