

## АГРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ НА БАЗІ WES-МЕТОДИКИ

*Любомир Крайник, д. т. н., професор, Петро Сивулька, аспірант*

*Львівський національний університет природокористування  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл.  
e-mail: l.krainyk@gmail.com; petr1111@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.48-56>

### **Крайник Л., Сивулька П. Агроекологічна оцінка машинно-тракторних агрегатів на базі WES-методики**

Активне розповсюдження важких машинно-тракторних агрегатів (МТА) зумовлює загострення проблеми переущільнення аграрних угідь і оперативної оцінки агроекологічності МТА на базі сучасного розвитку методів та інструментарію террамеханіки. Складність і тривалість оцінки впливу МТА на ущільнення ґрунту згідно з нормативною базою, опрацьованою понад 30 років тому, зумовлює актуальність її оновлення на базі сучасного розвитку оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту як опорної поверхні та впливу МТА.

Заслуговує на увагу так звана WES-методика інженерного корпусу армії США, що стала базовою в країнах НАТО для оцінки характеристик ґрунту / бездоріжжя та прохідності і мобільності руху техніки бездоріжжям. В основі оцінки стану ґрунту – твердість із оперативним визначенням пенетрометром із стандартизованим наконечником – значення так званого конусного індексу CI (cone index) та опрацьована методологія розрахунку прохідності та мобільності руху ґрунтовими поверхнями колісних і гусеничних машин. Окрім цього, враховується ефект доущільнення ґрунту колесами наступних після першої осей, зміна тиску в шинах та інші параметри машини. Звісно, для аграрної техніки необхідне ще врахування різних типорозмірів коліс передньої та задньої осей і динаміки зміни навантажень на осі для виконання операцій з обробітку ґрунту.

Проведено експериментальні дослідження (на прикладі трактора Fendt 1038 Vario з різними типорозмірами коліс передньої і задньої осей) та замірами твердості ґрунту у системі конусного індексу CI і плям контакту шин із ґрунтом. Отримані результати підтверджують сильний кореляційний зв'язок твердості та щільності ґрунту. Проаналізовано результати інших польових досліджень, де наявні дані щодо замірів твердості та щільності інших типів ґрунту, статистична обробка даних яких теж підтвердила факт сильної кореляції цих показників. Це дозволяє пропонувати і відповідні зміни до нормативної бази щодо агроекологічної оцінки МТА, що значно прискорює процес оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту.

**Ключові слова:** агроекологія, машинно-тракторні агрегати, ущільнення ґрунту, твердість ґрунту, пенетрометр, конусний індекс (CI).

### **Krainyk L., Syvulka P. Agroecological assessment of machine-tractor units based on WES methodology**

The increasing use of heavy machine-tractor units (MTUs) is exacerbating the issue of excessive soil compaction in agricultural land. This highlights the urgent need for a rapid and reliable assessment of their agro-environmental performance, particularly with the advancements in terramechanics theory and instrumentation. The complexity and lengthy processes involved in evaluating the impact of MTUs on soil compaction, guided by regulatory standards established over thirty years ago, underscore the necessity for revising these methodologies. A modern approach to assessing the physical and mechanical properties of soil as a load-bearing surface, along with its interaction with MTUs, is essential.

In this context, special attention should be given to the WES methodology, developed by the U.S. Army Corps of Engineers. This approach has become a benchmark for NATO countries in characterizing soil and off-road properties, as well as in determining the cross-country mobility of ground vehicles. The WES methodology is based on the operational assessment of soil strength using a standardized cone penetrometer, which produces the Cone Index (CI). This is combined with a validated computational framework that predicts the passability and mobility of wheeled and tracked vehicles over unpaved terrain. Additionally, it considers secondary compaction caused by the wheels of successive axles, variations in tire inflation pressure, and other machine-specific parameters. For agricultural machinery, it is also important to consider variations in the dimensions of the front and rear wheels, as well as the dynamic redistribution of axle loads during soil tillage operations. Experimental studies using the Fendt 1038 Vario tractor, with different wheel sizes on the front and rear axles, have been conducted. These studies measured soil hardness based on the Cone Index (CI) system and tire-soil contact patches. The results revealed a strong correlation between soil hardness and soil density. A review and analysis of additional field studies containing hardness and density data for various soil types further confirmed this correlation. This information allows for proposing necessary amendments to the existing regulatory framework for the agroecological assessment of agricultural machine-tractor units, significantly accelerating the evaluation of soil physical and mechanical properties.

**Keywords:** agroecology, machine-tractor unit (MTUs), soil compaction, soil hardness, penetrometer, Cone Index (CI).

**Постановка проблеми.** Інтенсифікація механічної обробки аграрних угідь високопродуктивними, важкими МТА обумовила загострення проблеми переуцільнення і деградації ґрунту [21], що, у свою чергу, робить актуальним оперативність агроecологічної оцінки конкретних МТА для поточного стану ґрунту. Нормативна база [6-8], основи якої опрацьовані ще у 1980-х роках, вимагає лабораторних методів оцінки стану ґрунту, є тривалою і практично не використовується у реальній практиці роботи фермерських господарств та агрохолдингів. Розвиток методів та інструментарію оцінки фізико-механічних характеристик ґрунтів упродовж останніх 30 років на базі замірів твердості, насамперед у ЄС та США, що поширюється і в Україні [12; 26], обумовлює актуальність і розвиток оперативності агроecологічної оцінки МТА в конкретних ситуаціях. Аналіз сучасних досліджень та нормативної бази у сфері агроecології [22] дозволяє констатувати реалії використання оцінки несучої здатності ґрунтів на базі так званої WES-методології (Waterway Experimental Station) Інженерного корпусу армії США (US Army Corps of Engineer). Започаткована ще з Другої світової війни, введена як нормативна база в арміях НАТО, вона вигідно вирізняється від досліджень у аграрній та лісогосподарській сферах опрацьованими емпіричними даними та залежностями оцінки динаміки руху колісних і гусеничних машин на ґрунтових поверхнях [4; 35]. Оцінка несучої здатності ґрунту базується на стандартизованій геометрії конусного наконечника пенетрометра [32] – отриманих значень так званого «конусного індексу» CI, що лежить в основі відповідних розрахункових залежностей прохідності, мобільності (потенційно можливих максимальних швидкостей руху) та відповідної деформації ґрунту (колії) [4; 35]. Оперативність оцінки твердості ґрунту (порівняно із щільністю, як базового параметра ґрунту у вітчизняній нормативній базі) і детально опрацьована WES-методика моделювання руху машин і взаємодії коліс із ґрунтовими поверхнями, що деформуються, обумовлюють доцільність розгляду можливого використання цих напрацьованих для експрес-оцінки агроecологічності МТА в конкретних ситуаціях. Тим паче, один з авторів наявної нормативної бази [6-8] – акад. НААНУ, проф. Медведєв В. В., віднедавна акцентує власне на твердості ґрунту як одного з визначальних параметрів, що безпосередньо пов'язаний із щільністю ґрунту [24; 27]. Остання – щільність – власне і покладена в основу нормативної

агроecологічної оцінки МТА, однак визначення її передбачає лабораторний і тривалий процес [2; 9]. Водночас нормативно визначена оцінка твердості ґрунту твердоміром Ревякіна сформована під взаємодію ґрунтообробних знарядь із ґрунтом (домінанта зсуву) і не є коректною щодо механізму взаємодії колеса з ґрунтовою опорною поверхнею (домінанта вертикальної деформації) [22; 10]. Очевидна доцільність прийняття в Україні як ДСТУ стандарту ISO [32], що є загальноприйнятим у країнах ЄС (а з 2019 р. уже і у РФ як ГОСТ Р), та нормативне узаконення вже існуючої практики виробництва й використання пенетрометрів в Україні, тим паче в умовах війни і гармонізації нормативної бази з НАТО щодо військової авто техніки [4].

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

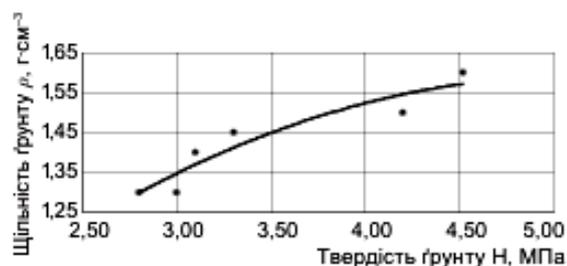
Очевидний кореляційний взаємозв'язок значень твердості та щільності ґрунту підтверджено як у вищезгаданих працях акад. НААНУ В.В. Медведєва, так і в низці сучасних досліджень, що безпосередньо не пов'язані з агроecологією, але де наведені дані оцінки твердості і щільності ґрунту на досліджуваних полях [1; 11; 20; 24; 27]. Найдетальніше це питання опрацьовано в публікації [1], де представлена графічна залежність взаємозв'язку обох параметрів (рис. 1), та наведено відповідну нелінійну кореляційну залежність:

$$\rho = -0,0547H^2 + 0,5592H + 0,1629 \quad (1)$$

Аналогічного характеру залежність наведена й у праці [14]:

$$\rho = 0,692 + 0,042H - 0,031H^2 \quad (2)$$

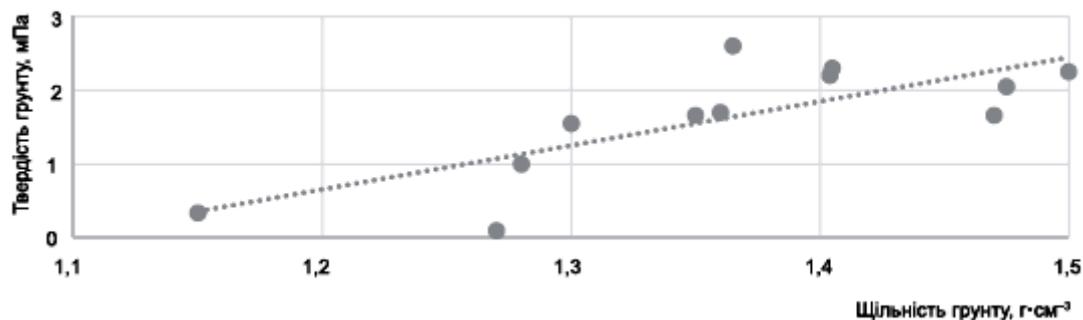
де  $H$  – твердість ґрунту, визначена за методикою Ревякіна [10], МПа;  $\rho$  – щільність ґрунту,  $г/см^3$ ;



**Рис. 1.** Залежність між щільністю ґрунту  $\rho$  та твердістю  $H$  згідно з [1]

**Fig. 1.** Relationship between soil density  $\rho$  and hardness  $H$  according to [1]

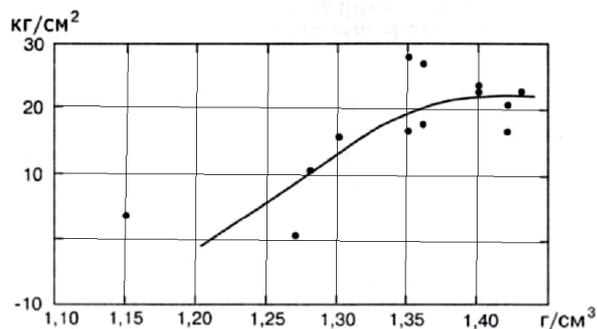
Водночас відомі й дослідження, що констатують лінійний кореляційний зв'язок даних характеристик ґрунту (рис. 2) [19], що загалом збігається із зарубіжними дослідженнями [33; 34].



**Рис. 2.** Залежність між щільністю та твердістю ґрунту згідно з [19]

**Fig. 2.** Relationship between soil density and hardness according to [19]

Однак за щільності ґрунту понад 1,35 г/см<sup>3</sup>, як свідчать результати ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського», залежність між цими параметрами набуває явно нелінійного характеру (рис. 3) [16].



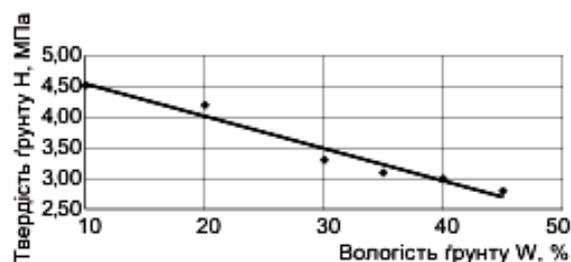
**Рис. 3.** Залежність між щільністю та твердістю ґрунту згідно з [16]

**Fig. 3.** Relationship between soil density and hardness according to [16]

Другим після щільності за значущістю фактором оцінки допустимого тиску МТА на ґрунт з умов агроекології [7] є вміст вологи (вологість) ґрунту, що нормативно згідно з ДСТУ ISO 10573-2001, ДСТУ ISO 11461-2004, ДСТУ ISO 16586-2005 вимагає доволі тривалої процедури (хоча віднедавна з'явилися і засоби оперативної оцінки, однак ще не включені до нормативної бази [3]). Із механіки ґрунтів логічним є практично лінійний зв'язок між вмістом вологи певного ґрунту і його твердістю, приклад експериментальних замірів чого представлено на рис. 4 [1]. Зрештою, вже опрацьовано й методику дистанційного зондування вмісту вологи з використанням супутникових технологій [29].

Реально значущим чинником агроекологічної оцінки МТА є також площа плями контакту шин,

що у нормативній базі базується на бетонній твердій опорній поверхні (з фіксованим одним значенням поправочного коефіцієнта для всіх типів і станів ґрунту) [6–8], та відчутно відрізняється від реальних значень при деформації ґрунту [23].



**Рис. 4.** Залежність твердості та вологості ґрунту згідно з даними [1]

**Fig. 3.** Dependence of soil hardness and moisture content according to data [1]

**Постановка завдання.** Оперативна оцінка ущільнення ґрунту МТА на базі використання WES-методики та заміру твердості ґрунту у формі конусного індексу СІ.

**Виклад основного матеріалу.** Для експериментальної оцінки реальних значень площі плями контакту та ущільнення ґрунту проведено польові дослідження на прикладі одного з найважчих колісних тракторів, який використовують аграрії в Україні – Fendt 1038/1050 Vario [25; 30] та який є найважчим у модельній гаммі (14 т) і обладнаний шинами різних типорозмірів на передній та задній осях (рис. 5, табл. 1). Утім у традиційному для країн ЄС звіті про польові випробування трактора цієї моделі відсутні дані щодо плями контакту та ущільнення ґрунту [31].

**Таблиця 1.** Базові параметри тракторів Fendt 1038/1050 Vario [30]  
**Table 1.** Basic parameters of Fendt 1038/1050 Vario tractors [30]

Параметри		Значення
Повна маса (без навісного обладнання), кг		14 300
Навантаження на осі: передня/задня, кг		6200/ 8100
Розмірність шин: передні	650/65R34; <u>650/65R38</u> ; 710/65R38	
задні	710/75R42; <u>750/75R46</u> ; 900/65R46	

*Примітка: підкреслений типорозмір шин підчас експерименту з Fendt 1038.*

Для експериментальної оцінки площі плями контакту шини з ґрунтом (на прикладі дослідного поля університету – темно-сірого легкосуглинкового опідзоленого, підготовленого до сівби [5]) використано товстостінну дерев'яну площадку для з'їзду колеса трактора на цільний ґрунт і фіксації власне контуру контакту, а не сліду – колії проїзду колеса (рис. 5).



**Рис. 5.** Визначення плями контакту шини задньої осі трактора Fendt 1038 Vario

**Fig. 5.** Determining the contact patch of the rear axle tire on a Fendt 1038 Vario tractor

Після фіксації контуру плями контакту (із зворотним рухом трактора через дерев'яну площадку) були здійснені й заміри твердості ґрунту на глибину обробітку. Для цього використано доопрацьований із заводом-виробником промисловий пенетрометр «ЛАН-М PRO» [28] і заміною конусних наконечників на конус із регламентованою геометрією згідно з WES-методикою НАТО [4; 35] та відповідними змінами у програмному блоці приладу (рис. 7).

Відчутна різниця у розмірах шин передньої та задньої осей а, відповідно, і заміряних площ контакту з опорною поверхнею ( $4937,7 \text{ см}^2$  та

$6476,3 \text{ см}^2$ ) та різне навантаження зумовили різне ущільнення – зміну твердості ґрунту в центрі плями контакту шин кожної з осей (табл. 2) (триразове дублювання дослідів).

Оцінка щільності ґрунту та вмісту вологи базувалась на звичній лабораторній процедурі із забором проб ґрунту на трьох рівнях глибини – 5, 10–15 та 20 см для трьох місць у доколі 0,4–0,6 м плям контакту та з використанням терез ВЛТК 5000 і сушильної електрошафи з нагрівом проб до  $150^\circ \text{C}$  (табл. 2). Забір проб здійснювався для плями заднього колеса і на ділянці поза межами контакту коліс трактора з ґрунтом (так звана контрольна ділянка). Однак загалом цей процес оцінки є тривалим і обмеженим для реального використання в реаліях АПК та достатнього обсягу вибірки з умов статистичної значимості.

Розрахунки кореляції між значеннями твердості і щільності та вмісту вологи ґрунту здійснювались комп'ютеризовано згідно з рекомендаціями проф. Надикто В. Т. [19] у програмному середовищі Microsoft Excell версії 2016. Отримані результати підтверджують (за співвідношенням F-критерію:  $F_{\text{факт}} \leq F_{\text{табл}}$ ) лінійну кореляційну залежність між щільністю  $\rho$  та твердістю  $N$  ґрунту дослідної ділянки із значенням коефіцієнта кореляції  $r = 0,758$  при статистичному рівні значущості 0,05 (опосередковані значення узагальнення шести замірів під колесами трактора та трьох замірів на ділянці поза колією коліс). Лінійна залежність характерна, як вище зазначено, для ґрунтів із щільністю у глибині замірів до  $1,35 \text{ г/см}^3$ .

Заміри реальних площ контакту шин трактора Fendt 1038 Vario на полі – опорній поверхні, що деформується, дозволяють дати і фактичну оцінку тиску ходової системи у цьому конкретному випадку з умов агроєкології. За відомого статичного навантаження на вісь (табл. 1) отримуємо: 62 кПа для коліс передньої осі та 61,4 кПа для задньої. Відповідно до нормативної бази [7], з урахуванням щільності ґрунту в шарі глибиною 0–10 см та вмісту вологи (табл. 2) це гранично допустимо для літньо-осіннього періоду (але перевищує гранично допустимі значення для весни).



**Рис. 6.** Фіксація плями контакту заднього колеса трактора і твердості ґрунту

**Fig. 6.** Fixing the contact patch of the rear wheel of the tractor and soil hardness



**Рис. 7.** Інтерфейс твердоміра «ЛАН-М PRO» із записом вимірювання

**Fig. 7.** Interface of the “LAN-M PRO” hardness tester with measurement recording

**Таблиця 2.** Результати замірів твердості ґрунту СІ та вибірки проб оцінки щільності та вологості (дослідне поле ЛНУП) з Fendt 1038 Vario

**Table 2.** Results of soil hardness measurements CI and sampling for density and moisture assessment (experimental field of LNEU) with Fendt 1038 Vario

Глибина, см	Значення твердості СІ, кПа / щільності ґрунту, г/см <sup>3</sup> (вологість,%)								
	Заднє колесо			Переднє колесо			Поза колесами		
2,5	765,6	669	722	986	757	801	528	458	537
5	1100/ 1,2(7)	1135/ 1,3(7)	1135/ 1,3(7)	994	906	1047	563/ 1,12(5,1)	519/ 1,04(5,7)	607/ 1,2(4,8)
7,5	1082	1320	1250	1179	1082	1153	590	572	651
10	1135	1373	1390	1276	1223	1267	968	810	906
12,5	1003/ 1,3(9,6)	1294/ 1,5(11)	1320/ 1,6(11)	1373	1302	1382	1126/ 1,4(8,6)	950/ 1,2(9,8)	1091/ 1,3(8,8)
15	10,3	14,1	1223	1390	1390	1443	1047	968	1030
17,5	1214	1769	1646	1575	1505	1566	1179	1241	1197
20	1593/ 1,4(12)	1971/ 1,6(16)	1866/ 1,6(13)	1663	1690	1742	1549/ 1,5(13,9)	1593/ 1,4(14,7)	1540/ 1,4(13,4)
22,5	1716	2033	1927	1936	1830	1901	1584	1566	1681

Кількісна оцінка рівня кореляційного зв'язку, очевидно, залежить і від типу ґрунту. Щодо чорноземів, як найбільш актуальних в Україні (але відсутніх серед дослідних полів нашого університету), був проведений пошук і аналіз досліджень за іншими тематиками, але де були б наведені дані щодо замірів твердості і щільності чорнозему,

бажано й вологості. Звично, що твердість при цьому замірювалась традиційним твердоміром Рев'якіна або, деколи, уже пенетрометром іншої моделі (з дещо іншим наконечником, але малий наконечник останнього досить незначно відрізняється від WES- наконечника, а питання зіставлення власне кількісної оцінки різним інструментарієм

загалом потребує окремого дослідження). Зокрема при нещодавній оцінці гетерогенності агрофізичної якості чорнозему [20] наведені досить цікаві дані щодо всіх трьох параметрів чорнозему для трьох ділянок впродовж 4-х місяців (табл. 3). Щоправда, відсутня інформація стосовно глибини замірів та техніки під час посіву та збору урожаю. Техніка – дві моделі колісних сівалок та заміри поза сівалкою – представлені у дослідженні ефективності прямої сівби на важко суглинковому чорноземі правобережного степу (табл. 4) [27].

Проведені розрахунки кореляційної залежності – оцінки щільності ґрунту від його твердості. Обсяг вибірки даних є незначним, однак для травня (після посіву) та для вересня (після збору урожаю) щільність ґрунту перевищує

1,35 г/см<sup>3</sup> і значення отриманого коефіцієнта детермінації  $r^2 = 0,22$  для оцінки лінійної кореляції є мінімальним і зумовило проведення розрахунку кореляційного відношення – нелінійного взаємозв'язку твердості і щільності:

$$\rho = 0,621 + 0,052H - 0,029H^2 \quad (3)$$

Зменшення рівня кореляційного взаємозв'язку можна пояснити зміною агрофізичних характеристик ґрунту із квітня по вересень із двома циклами замірів при механічному обробітку та двома циклами без нього (відчутні відповідні перепади щільності та твердості у 1,2–1,5 рази (див. табл. 3)). Відсутність даних щодо використаних МТА не дозволяє дати їхню агроекологічну оцінку, але дозволяє констатувати очевидний взаємозв'язок базових показників ґрунту.

**Таблиця 3.** Агрофізичні характеристик 3-х ділянок чорнозему згідно з [20]

**Table 3.** Agrophysical characteristics of three black soil plots according to [20]

Ділянка, параметри		До посіву, квітень	Після посіву, травень	Вегетація, серпень	Після збору, вересень
1	Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,39	1,61	1,25	1,39
	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	16,1	10,6	9,5	11,7
	Вологість, %	16,58	16,03	20,10	23,33
2	Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,14	1,58	1,35	1,50
	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	11,2	11,7	10,8	14,5
	Вологість, %	21,04	17,24	19,53	23,54
3	Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,35	1,46	1,34	1,43
	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	11,1	11,6	10,8	13,5
	Вологість, %	18,01	19,29	20,06	21,50

**Таблиця 4.** Зміна характеристик важкосуглинкового чорнозему при сівбі сучасною технікою [27]

**Table 4.** Change in the characteristics of heavy loamy black land soil when sowing using modern technologies [27]

Показник	Шар ґрунту, см	Параметри	Контроль	John Deere 730	Great Plains CPН-1500
Повні сходи	0-10	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	2,830	2,46	2,420
		Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,195	1,113	1,10
		Вологість, %	6,74	6	8,8
	10-20	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	9,22	6,21	7,74
		Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,265	1,213	1,17
		Вологість, %	10,6	9,9	8,9
	20-30	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	19,90	13,32	17,21
		Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,31	1,40	1,31
		Вологість, %	8,9	6,2	9,4
Перед збиранням урожаю	0-10	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	3,41	3,46	4,80
		Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,183	1,04	1,035
		Вологість, %	10,2	3,8	12,6
	10-20	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	11,36	13,08	19,10
		Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,22	1,17	1,17
		Вологість, %	7,5	6,8	9,8
	20-30	Твердість, кг/см <sup>2</sup>	23,35	27,38	32,00
		Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,187	1,212	1,232
		Вологість, %	8,9	8,4	11,1

Для важкосуглинкового чорнозему представлені дані (табл. 4) [27]. Надані дані характеристик ґрунту щодо двох періодів між механообробітком і зафіксовані значення щільності ґрунту  $< 1,35 \text{ г/см}^3$  дозволяють розрахувати власне лінійну кореляцію між твердістю та щільністю для нашого випадку  $r = 0,754$ . Незначне зниження рівня кореляції порівняно з відомим дослідженням щодо цього ж типу ґрунту пояснюється, мабуть, узагальненням за трьома типами ділянок поля – контрольної та двох із дещо різним механічним обробітком, а також узагальненням за двома періодами часу (повні сходи та перед збиранням урожаю (див. табл. 4). Аналогічно щодо кореляційного зв'язку значень твердості та вологості ґрунту, де вплив пори року та механообробітку ще більш відчутний і з умов забезпечення довірчої ймовірності 95 % обумовлює розмежування рівня кількісної оцінки

взаємозв'язку для різних пор року. (Певним чином це підтверджується й наявною диференціацією норм допустимого максимального тиску рушіїв МТА залежно від пори року та п'яти діапазонів вмісту вологи в ґрунті).

Для цього ж типу ґрунтів цікавими є дані Харківської наукової школи щодо оцінки ефективності трактора ХТЗ-17221 [15], де представлені й результати випробувань щодо оцінки ущільнення ґрунту (табл. 5). Трактор обладнаний шинами однакового типорозміру передньої і задньої осей із майже однаковим навантаженням на осі, що дозволяє за даними цих досліджень оцінити й ефект доущільнення ґрунту при проходженні другої осі по колії передньої, визначення якого за вітчизняною нормативною базою [6] і нормативною базою НАТО – WES – методикою [4; 35] суттєво відрізняються.

**Таблиця 5.** Зміна твердості і щільності ґрунту у літній період після коліс передньої та задньої осей трактора ХТЗ-17221 [15]

**Table 5.** Change in soil hardness and density in summer after the front and rear axles of the HTZ-17221 tractor [15]

Глибина, см	Контрольна ділянка		Щільність за мостами, $\text{г/см}^3$		Твердість за мостами, МПа	
	щільність, $\text{г/см}^3$	твердість, МПа	Передній	Задній	Передній	Задній
0-10	1,04	0,76	1,20	1,24	1,50	1,70
10-20	1,16	1,26	1,28	1,30	1,95	2,15
20-30	1,24	1,54	1,32	1,36	2,20	2,44
30-40	1,28	1,80	1,36	1,39	2,48	2,61
40-50	1,31	2,05	1,39	1,41	2,74	2,76

З аналізу даних табл. 2 і 5 випливає насамперед доцільність використання для кількісної оцінки кореляційного зв'язку між вищезгаданими параметрами ділянок, що ще піддавались впливу МТА і ущільненню та механічному впливу (контрольна ділянка). З умов реального поширення так званих «груш деформації» від коліс на глибину понад 30 см очевидна доцільність глибини заміру до 50 см, що дозволить при різкому зростанні значень зафіксувати наявність «підорної підшви» та вжити заходи проти деградації ґрунту [22]. Заміри по колії трактора дозволяють оцінити уже наслідки машинного обробітку землі.

### Висновки

Проведені дослідження дозволяють констатувати значну кореляцію між значеннями твердості ґрунту (як конусного індексу CI) та його щільності й вологості (у межах діапазону значень, характерних для аграрних операцій обробітку). Звично, що чисельні значення коефіцієнтів кореляції для різних типів ґрунтів (чорнозем, суглинок, супісок)

відрізняються. Однак у всіх випадках кореляція вищезазначених параметрів є сильною, що дозволяє оперативну агроекологічну оцінку МТА для конкретного поля із заміром значень твердості сучасними пенетрометрами із стандартизованим конусним наконечником (CI) під вимоги WES-методики. Очевидна, відповідно, актуальність прийняття в Україні як ДСТУ міжнародного стандарту ISO 22476-1:2012 та подальшого розвитку вітчизняної нормативної бази – ДСТУ 4428:2005, ДСТУ 4521:2006 та ДСТУ 4977:2008, що дозволило б проводити агроекологічну оцінку МТА в конкретних умовах в режимі реального часу. При цьому слід врахувати реалії різних типорозмірів коліс передньої та задньої осей і ефект додаткового ущільнення ґрунту колесами задньої осі при послідовному проходженні в одній колії. Потребує розвитку і нормативна оцінка площі плями контакту шин, що реально більша на ґрунтах порівняно з передбаченою ДСТУ оцінкою – заміром на твердій, бетонній поверхні, а також відповідною корекцією її значення залежно від

навантаження на колесо, тиску повітря в шині та типу шин (діагональні, радіальні і т.п.).

### Бібліографічний список

1. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Кувачов В. П., Головач І. В., Ігнат'єв Є. І., Черниш О. М. Дослідження властивостей постійної технологічної колії, яку використовують при мостовому землеробстві. *Вісник аграрної науки* 2020, № 8 (809). С. 63–68. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-08>.
2. Боднарчук А. С. Підвищення ефективності використання колісного трактора тягового класу 3,0 на польових роботах з різними типами шин. Магістерська робота. Дубляни: Львівський НАУ. 2021. 84 с.
3. Вологомір ґрунту, піску, торфу МГ-44 (MG44). URL: <https://shop.gpsgeometer.com/ua/products/vologomir-gruntu-pisku-torfu-mg-44> (дата звернення: 10.02.2025).
4. Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прохідність військових автомобілів: монографія. Київ: Професіонал, 2023. 182 с.
5. Ґрунти Львівської області: колективна монографія / за ред. С. П. Позняка. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2019. 424 с.
6. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. Київ: Держспоживстандарт, 2005. 10 с.
7. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. Київ: Держспоживстандарт, 2006. 8 с.
8. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем. Київ: Держспоживстандарт, 2008. 10 с.
9. ДСТУ 4745:2007. Якість ґрунту. Визначення щільності твердої фази пікнометричним методом. Київ: Держспоживстандарт, 2007. 12 с.
10. ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твердоміром Ревякіна. Київ: Держспоживстандарт, 2008. 8 с.
11. Жуков О. В., Задорожна Г. О., Коцун В. І., Мізін М. С. Дерново-алювіальні ґрунти у заплаві р. Дніпро в межах природного заповідника «Дніпровсько-Орільський»: морфологія та профільний розподіл фізичних властивостей. *Вісник Дніпропетровського аграрно-економічного університету*. 2016. № 4 (42). С. 44–55.
12. Іванишин В. В., Рудь А. В., Мошенко І. О. Визначення переущільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2017. Вип. 27. С. 146–158.
13. Качинский Н. А. Физика почвы. Ч. 2. Москва: Высшая школа, 1970. 360 с.
14. Кушнарев А. С., Кравчук В. И., Кушнарев С. А., Дюжаев В. П. Мониторинг плотности почвы пахотного горизонта в системе точного (управляемого) земледелия. *Техніка і технології АПК*. 2010. № 9 (12). С. 12–16.
15. Лебедев С., Коробко А., Лебедев А., Шуляк М. Технологічна адаптація тракторів загального призначення до природних умов ґрунтообробки. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технології для сільського господарства України*. 2023, т. 2, № 33 (47). С. 57–67. [https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33\(47\)-5](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-2-33(47)-5).
16. Медведєв В. В., Лындина Т. Е., Лактионова Т. Н. Плотность сложения почв. Харків: 13 типографія, 2004. 243 с.
17. Медведєв В. В. Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій технічних засобів з його обробітку (Soil hardness as a criterion for justifying technologies and technical means for its cultivation). *Вісник аграрної науки*. 2010. № 4. С. 14-18.
18. Медведєв В. В. Твердість почв. Харків: КП «Городская типографія», 2009. 152 с.
19. Надикто В. Т. Обґрунтування методу апроксимації експериментальних даних. *Вісник аграрної науки*. 2024. № 9 (858). С. 38–44. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202409-05>
20. Погромська Я. А. Динаміка гетерогенності агрофізичної якості чорнозему звичайного у межах сільськогосподарського поля. *Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник*. 2023. Вип. 94. Харків: ННЦ «ІА ім. О. Н. Соколовсько». С. 39–53.
21. Ребров О. Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях»*. 2018. № 27. С. 110–116.
22. 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.
23. Сивулька П., Сукач О. Оцінка площі плями контакту шини на ґрунтових поверхнях. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2025. № 1 (24), ЛНТУ, Луцьк, С. 399–408. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1747>
24. Сиромятников Ю. М. Вплив способів прямої сівби на ріст, розвиток і урожайність зерна ячменю ярого в умовах північно-східної частини України. *Зернові культури*. 2020. Том 4, № 2. С. 296–304. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0138>.
25. Трактор Fendt 1000 генерація 3. URL: [https://dam.agcocorp.com/content/dam/multisite/fendt/marketing/multi-region/documents/marketing-material/brochures/tractors/1000-vario-gen3/uk/Fendt1000VarioGen3\\_UK\\_web.pdf](https://dam.agcocorp.com/content/dam/multisite/fendt/marketing/multi-region/documents/marketing-material/brochures/tractors/1000-vario-gen3/uk/Fendt1000VarioGen3_UK_web.pdf) (дата звернення: 10.02.2025).
26. Цизь, І. Є., Голій, В. О. Результати дослідження твердості ґрунту полів ДПЕДГ «Еліта». *Сільськогосподарські машини*. 2024. № 50. С. 25–36. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.133>.
27. Черячукін М. І., Григор'єва О. М. Ефективність прямої сівби на чорноземі звичайному важко-суглинковому правобережного степу. *Вісник аграрної*

науки. 2019. № 10 (799). С. 5–11. <https://doi.org/20.31073/agrovisnyk201910-0>.

28. Щільномір для ґрунту ЛАН-М PRO з функцією GPS. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html> (дата звернення: 10.02.2025).

29. EOSDA Grop Monitoring. URL: <https://eos.com/uk/blog/volohist-gruntu> (дата звернення: 10.02.2025).

30. Fendt 1000 Vario. URL: <https://www.fendt.com/de/geneva-assets/article/26673/228925-fendt1000vario-1902-td-de.pdf> (дата звернення: 10.02.2025).

31. FENDT 1046 VARIO. DLG-анерkannt: "powermix" Leistung und Kraft-stoffverbrauch im Feld- und Transporteinsatz. DLG – Pruefbericht 7533. URL: <https://www.dlg-testservice.com/de/agrartechnik-betriebsmittel/fahrzeugtechnik-traktoren>. (дата звернення: 10.02.2025).

32. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.

33. Kumar A., Chen Y., Sadek M. A. A. et al. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. *Research in Agricultural Engineering: CIGR J.* 2012. V. 14, Is. 1. P. 26–37.

34. Sayedahmed A. Modeling and Correlation of Soil Cone Index for Bulk Density, Moisture Content and Penetration Depth Levels in a Sandy Loam Soil. *J. of Soil Sciences and Agricultural Engineering.* 2015. V. 6, Is. 2. P. 259–273.

35. Wong Y. J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. Butterworth. London, 2010. 482 p.

*Стаття надійшла 12.02.2025*