e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PENETRATION FORCE OF A DEEP-TILLAGE MACHINE'S WORKING TOOL

V. Holii*, A. Motsiuk, M. Linnik, A. Popik

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
soil hardness,
deep loosening,
tubular working element,
penetration force,
dynamometric yoke

Article history:
Received 25.09.2026
Reviewed 05.10.2026
Approved 30.10.2026

***Corresponding author:**
tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

ABSTRACT

The most effective and accessible method for loosening the compacted sub-surface soil layer is the use of subsoilers. Existing subsoiler designs are characterized by high energy consumption per unit of tilled area. They do not allow for real-time adjustment of tillage depth based on soil hardness maps. These technical shortcomings can be addressed by breaking up the compacted layer through a process of cutting holes with a tubular working tool and subsequently conveying the excavated soil to the field surface. The aim of this study is to experimentally determine the effect of the tubular working tool's diameter on the force required for its penetration into the soil. The research was conducted on a plot where soil hardness in the upper horizon (0–10 cm) ranged from 4 to 13.1 kg/cm^2. In the 10–25 cm horizon, hardness ranged from 9.6 to 44.1 kg/cm^2. At a depth of 25–45 cm, a sharp increase in hardness to 61.6 kg/cm^2 was observed, indicating the presence of a critically compacted soil layer. In the 45–60 cm horizon, hardness decreased to 32.3–35 kg/cm^2. Experimental results indicate that a maximum force of 4,000 N occurs during the penetration of tubular working elements with diameters of 30 mm and 50 mm, whereas the lowest maximum force—3,800 N—is observed with the 40 mm diameter element. Therefore, the 40 mm diameter working element is the most suitable choice for practical application. The validity of the experimental findings is confirmed by the fact that the maximum penetration force of 4,000 N corresponds to the maximum soil hardness value of 60 kg/cm^2 obtained during testing with a hardness meter.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2345

To cite this article:
Holii, V., Motsiuk, A., Linnik, M. & Popik, A. (2026). Experimental studies of the penetration force of a deep-tillage machine's working tool. *Agricultural Machines*, *52*, 189–197. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2345

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 631.3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУСИЛЛЯ ЗАГЛИБЛЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ ЗНАРЯДДЯ ДЛЯ ГЛИБОКОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

В.О. Голій*, А.І. Моцюк, М.О. Линник, А.С. Попік

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
твердість ґрунту,
глибоке розпушення,
трубчастий робочий орган,
зусилля заглиблення,
динамометрична скоба

Історія публікації:
Отримано 25.09.20026
Прорецензовано 05.10.2026
Затверджено до друку 30.10.2026

***Автор для листування:**
tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

АНОТАЦІЯ

Найбільш ефективним і доступним способом розпушення підорного переущільненого шару ґрунту є використання глибокорозпушувачів. Існуючі конструкції глибокорозпушувачів характеризуються високими енергетичним затратами на одиницю обробленої площі. Вони не передбачають можливості зміни глибини обробітку у режимі реального часу на основі картограм твердості ґрунтів. Вирішення таких технічних недоліків можна забезпечити шляхом застосування для руйнування цілісності переущільненого шару принципу прорізання отворів трубчастим робочим органом із наступним переміщенням вирізаного ґрунту на поверхню поля. Метою дослідження є встановити експериментально вплив діаметра трубчастого робочого органу на зусилля необхідне для його заглиблення у ґрунт. Дослідження проводили на ділянці твердість ґрунту у верхньому горизонті (0-10 см) якої знаходилась у межах від 4 до 13,1 кг/см^2. У горизонті 10-25 см твердість складала 9,6-44,1 кг/см^2. На глибині 25-45 см спостерігалось різке зростання твердості до 61,6 кг/см^2, що свідчить про наявність критично переущільненого шару ґрунту. У горизонті 45-60 см твердість зменшувалась до 32,3-35 кг/см^2. За результатами експериментальни досліджень встановлено, що максимальне зусилля у 4000 Н виникає при заглибленні трубчастих робочих органів діаметром 30 мм та 50 мм, а найменше максимальне зусилля у 3800 Н – для робочого органу діаметром 40 мм. Тому для практичного використання доцільно рекомендувати саме робочий орган із діаметром 40 мм. Адекватність отриманих експериментальних досліджень підтверджується тим, що максимальне значення зусилля заглиблення робочого у 4000 Н відповідає максимальному значення твердості ґрунту отриманого у результаті його дослідження твердоміром у 60 кг/см^2

DOI: 10.36910/acm.vi52.2345

Цитувати цю статтю:
Голій, В. О., Моцюк, А. І., Линник, М. О. & Попік, А. С. (2026). Експериментальні дослідження зусилля заглиблення робочого органу знаряддя для глибокого обробітку ґрунту. *Сільськогосподарські машини*, *52*, 189–197. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2345

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останнім часом спостерігається зростання негативного впливу інтенсифікації сільськогосподарського виробництва на стан ґрунтів. Основною проблемою є переущільнення орного та підорного шарів, яке виникає під дією робочих органів ґрунтообробних машин та ходових систем тракторів, комбайнів тощо. Таке ущільнення призводить до погіршення якості ґрунтів, сприяє підвищенню ерозії та деградації ґрунтів, значному зменшенню їх родючості. У сукупності всі ці фактори знижують врожайність вирощуваних культур *(Макаренко, n.d.; Колюбакін, n.d.)*. Дослідженнями встановлено що понад 40 % ґрунтів в Україні мають ознаки деградації через їх переущільнення *(Медведєв, 2004)*.

У працях *(Swan et al., 2026; Davies, 2019*; *Бромот, n.d., Гаврилов, 2015)* встановлено, що наявність переущільненого шару перешкоджає нормальному росту і розвитку сільськогосподарських культур. Причиною цьому є широке коло факторів, але основним із яких є опір проникненню кореневої системи рослин у нижні шари.

Наявність переущільненого підорного шару, що утворюється під впливом сільськогосподарської техніки також негативно впливає на накопичення та збереження вологи під час дощових періодів, а також на її доступність у посушливі періоди. За наявності плужної підошви показники вбирання атмосферних опадів ґрунтом знижується в 3-4 рази *(Грицишин n.d.)*

Найбільш результативним та водночас доступним способом збільшення глибини розпушеного шару ґрунту є застосування глибокорозпушувачів. Такий вид обробітку передбачає подрібнення, рихлення та часткове перемішування ґрунту без перевертання пласта. У процесі роботи даної машини відбувається розущільнення орного шару, що також дозволяє знизити ризиків впливу водної ерозії. (Макаренко, *n.d.*). Для реалізації цього заходу використовуються чизельні культиватори та глибокорозпушувачі. Основним робочим органом таких знарядь є лапа *(Bednar, n.d.; Gregoire-besson n.d.; Greatplain, n.d.; Wil-rich, n.d.; Jympa, n.d.)*. Від форми лапи залежить і результат, що буде досягнуто під час розпушення ґрунту *(Голій & Цизь, 2024; Цизь. & Голій, 2024a)*.

Аналіз та узагальнення досліджень твердості ґрунтів виявили значні коливання глибини залягання переущільнених шарів в умовах навіть невеликих за площею земельних ділянок *(Цизь & Голій, 2024b)*. Конструкції згадуваних глибокорозпушувачів забезпечують суцільне розпушення підорних шарів на постійну глибину. Глибину ходу робочих органів визначають за максимальним значенням глибини розташування плужної підошви на усьому полі. Регулювання глибини ходу робочих органів здійснюють шляхом регулюванням положення опорних коліс. У такому випадку мають місце підвищені (не раціональні) енергетичні затрати на одиницю обробленої площі.

Інноваційні підходи до землеробства та обробітку землі відкривають широкі перспективи для підвищення ефективності аграрного виробництва та збереження родючості ґрунтів. Сучасні технологічні рішення в обробці ґрунту сприяють зниженню виробничих витрат, підвищенню ефективності та продуктивності робіт та забезпечують сталий розвиток аграрних підприємств *(Марченко, n.d.)*.

Науковим дослідженням із обґрунтування форми робочих органів глибокорозпушувачів надавалось багато уваги закордонними вченими ще у минулому сторіччі *(Spoor & Godwin,1978; Soane et al., 1986)*. У вітчизняній науці розвивається напрямок обґрунтування форми робочого органу глибокорозпушувача на основі принципів біоніки *(Tesliuk at al.,2019; Волик at al., 2020)*. Також відомі дослідження робочих органів глибокорозпушувачів з метою їх викортсання під час обробки меліорованих земель *(Kravets at al.,2021)*. Проте спільним для усіх цих досліджень є удосконалення робочого органу, що має у своїй основі форму двогранного клина та чинить стискаючий та згинаючий силовий вплив на ґрунт.

Для реалізації принципу розпушення переущільнених шарів ґрунту, відмінного від раніше описаного, нами розроблена конструкція машини із робочим органом трубчастої форми, який прорізає вертикальні отвори у ґрунті. При цьому ґрунт із вирізаних отворів виноситься на поверхню поля *(Голій, 2025)*. Завдяки такому обробітку утворюються порожнини для проникнення кореневої системи рослин до нижніх горизонтів ґрунту, інтенсифікується газообмін та покращується водний режим ґрунту. З часом вирізані отвори будуть заповнені ґрунтом через природні процеси формування його структури, а отже відбуватиметься процес зворотній до ущільнення.

Зважаючи на те, що запропонований спосіб є новим то вимагає всебічного теоретичного та експериментального дослідження вплив конструктивних характеристик робочого органу на якісні та енергетичні параметри процесу.

Мета дослідження – експериментально дослідити вплив діаметра трубчастого робочого органу на зусилля необхідне для його заглиблення у ґрунт.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для руйнування плужної підошви методом вирізання отворів були виготовлені три варіанти робочих органів які наведені на **рис. 1**. Конструктивні розміри наведених робочих органів такі: зовнішній діаметр 30 мм, 40 мм та 50 мм; довжина 600 мм (для трьох варіантів).



Рис. 1 - Варіанти робочих органів ґрунтообробного знаряддя

Для вимірювання зусилля, яке затрачається на заглиблення робочого органу у ґрунт використовували скобу динамометричну 1 оснащену цифровим індикатором переміщення 2 (**рис. 2**). Для фіксування значення зусилля із глибиною проникнення робочого органу у реальному часі на ПК 5 використовували перетворювач сигналу 3 та реле часу 4. Зусилля створювали гідравлічною навіскою трактора 6.



Рис. 2 - Обладнання для дослідження зусилля заглиблення робочого органу у ґрунт: 1 – скоба динамометрична; 2 – цифровий індикатор переміщення; 3 – перетворювач сигналу; 4 – реле часу; 5 - ПК

Під час експерименту у електронній таблиці Microsoft Excel фіксувалась виміряна електронним індикатором 2 деформація пружинної скоби 2. Для отримання значень зусилля заглиблення робочого органу значення деформації множили на коефіцієнт жорсткості скоби.

Для визначення коефіцієнт жорсткості скоби (тарувального коефіцієнта), яким визначається залежність між деформацією динамометричної скоби та прикладеною силою стиску було проведено відповідне дослідження на пресі компресійного приладу КПр-1. Цей прес дозволяє прикладати до скоби ступінчате зусилля стиску через двоступінчастий шків із передатнім відношенням 1:10 (**рис. 3**).



Рис. 3 - Проведення тарування скоби динамометричної

За допомогою приладу прикладали першу ступінь зусилля стиску у 300 Н і далі збільшуючи з кроком у 300 Н до досягнення значення у 2100 Н. Прикладання зусилля здійснювали шляхом вкладання гир масою 3 кг на навантажувальну підвіску приладу. На кожному рівні утримання зусилля відбувалось до моменту стабілізації показників цифрового індикатора. Після цього відповідне переміщення передавалось у електронну таблицю Microsoft Excel на ПК, а навпроти нього через клавіатуру вводилось відповідне значення зусилля стиску. За отриманим значеннями тарувального коефіцієнта для кожного навантаження розрахували середнє його значення.

З метою встановлення розподілу твердості ґрунту за глибиною на дослідній ділянці де проводили випробування робочих органів використовували твердомір «Лан-М PRO» (**рис. 4**)



а



б

Рис. 4 – Загальний вигляд твердоміра ґрунту «Лан-М PRO» (а) та головне зображення дисплею (б): 1 – металевий щуп; 2 - наконечник малий (d=12,7 мм); 3 – електронний блок; 4 – основа із рукоятками; 5 – наконечник великий (d=19,1 мм)

Для оцінки твердості ґрунту перед проведенням експериментальних досліджень були здійснені відповідні вимірювання в трьох фіксованих точках дослідної ділянки. Положення цих точок задавались за допомогою додатку Soil Sampler, що забезпечило точне повторення координат під час кожного етапу дослідження. Повний опис використовуваної методики дослідження розподілу твердості наведену у праці *(Цизь & Голій 2024b)*.

Під реалізації експерименту із визначення зусилля заглиблення робочого органу у ґрунт використовували обладнання наведене на **рис. 2**. Спочатку на поверхню ґрунту вертикально встановлювали один робочий орган із варіантів наведених на **рис. 1**. Далі на його верхню опору встановлювали динамометричну скобу 1 із індикатором переміщення 2. Останній у свою чергу через перетворювач сигналу 3 з'єднувався із USB-портом ПК.

Після цього гідророзподільник керування навіскою трактора встановлювали у плаваюче положення та опускали поперечну балку зусиллям руки до її контакту із верхньою частиною динамометричної скоби. Далі вмикали передачу даних від цифрового індикатора на ПК шляхом вмикання реле часу 4 і переводили важіль гідророзподільника керування навіскою у примусове опускання. За таких умов відбувалось прикладання зусилля від навіски трактора до досліджуваного робочого органу. Реалізація експерименту тривала до тих пір поки робочий орган не занурився у ґрунт на глибину 500 мм (визначали за міткою нанесеною на робочому органі). Після цього важіль гідророзподільника переводили у положення підіймання і знімали навантаження з робочого органу. Робочий орган із ґрунту виймали вручну. Реалізацію експерименту для кожного робочого органу здійснювали із трикратною повторюваністю шляхом переміщення установки на 1 м вперед за ходом трактора та його повторення за описаною послідовністю.

За кожною повторюваністю в електронній таблиці Microsoft Excel отримували набір значень показів цифрового індикатора переміщення. На основі цих значень розраховували зусилля заглиблення робочого органу у ґрунт за формулою

$$F_i = \left(\Delta_i - \Delta_0\right) \cdot k_c, \tag{1}$$

де Δ_0 - покази індикатора до початку прикладання зусилля від навіски трактора, мм

Δ_i - поточне виміряне цифровим індикатором та передане до електронної таблиці значення, мм;

k_c - коефіцієнт жорсткості динамометричної скоби (тарувальний коефіцієнт), Н/мм.

Для встановлення відповідності між визначеним зусиллям F_i та величиною заглиблення H_i робочого органу вважали, що швидкість заглиблення була постійною та використовували залежність

$$H_i = \frac{500}{n} \cdot i \quad (2)$$

де 500 мм – максимальне заглиблення робочого органу у ґрунт;

n - кількість вимірів, які надіслані від цифрового індикатора до електронної таблиці;

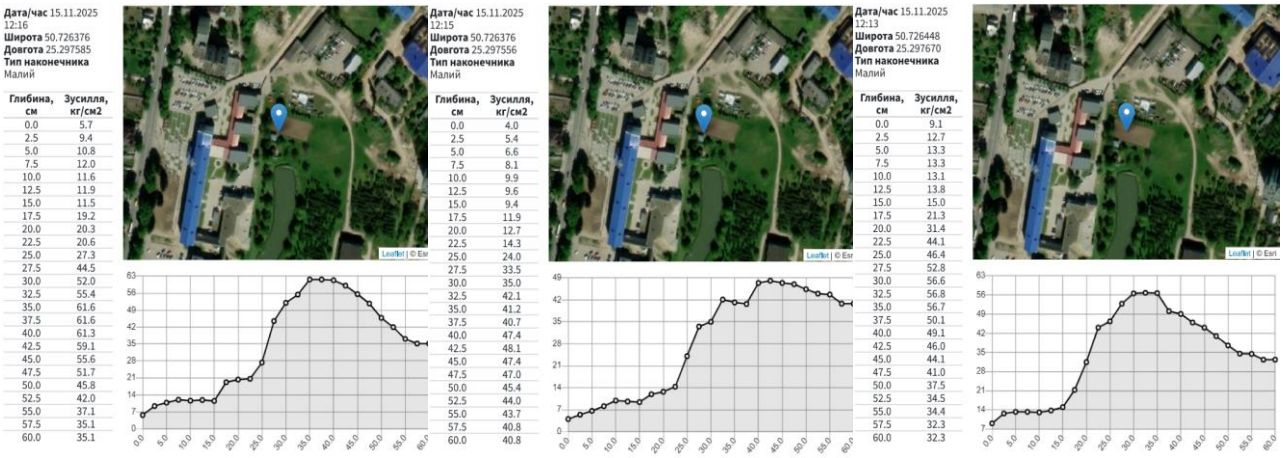
$i = 1...n$ - номер вимірювання для якого розраховувалась глибина.

Кількість вимірювань складала у межах від 15 до 24 та визначалась часом між вимірюваннями у 0,33 с (час між замиканням контактів реле 4) і тривалістю поточного експерименту (час протягом якого робочий орган занурювався на глибину від 0 до 500 мм).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У результаті експериментального дослідження деформації динамометричної скоби та розрахунків значення тарувального коефіцієнта k_c отримали його значення у діапазоні від 4934 Н/мм до 5164 Н/мм за зміни стискаючого зусилля від 300 до 2100 Н. Розраховане середнє значення тарувального коефіцієнта склало $k_c = 5020$ Н/мм, яке і підставляли у формулу (1) під час розрахунку зусилля заглиблення робочого органу у ґрунт.

Отримані у результаті вимірювань твердоміром «Лан-М PRO» значення та опрацювання у програмі FIELD-M Archive Viewer 2.4. графіки зміни твердості ґрунту наведені на **рис 5**. Аналіз графічних залежностей показує, що у верхньому горизонті (0-10 см) твердість ґрунту знаходиться у межах від 4 до 13,1 кг/см^2 та є сприятливою для вирощування сільськогосподарських культур. У перехідній зоні (10-25 см) твердість складала 9,6-44,1 кг/см^2. На глибині 25-45 см спостерігалось різке зростання твердості до 61,6 кг/см^2, що свідчить про наявність критично переущільненого шару ґрунту. Саме ця зона потребує глибокого розпушення. У шарів ґрунту на глибині 45-60 см спостерігалось зменшення твердості до 32,3-35 кг/см^2. Проте і ці значення виходять за межі допустимих.



а б в

Рис. 5 - Результати вимірювання твердості ґрунту у трьох точках (а, б, в) дослідної ділянки

Опрацьовані на ПК середні значення зусилля F заглиблення робочого органу у ґрунт для відповідних його діаметрів наведені на **рис. 6**.

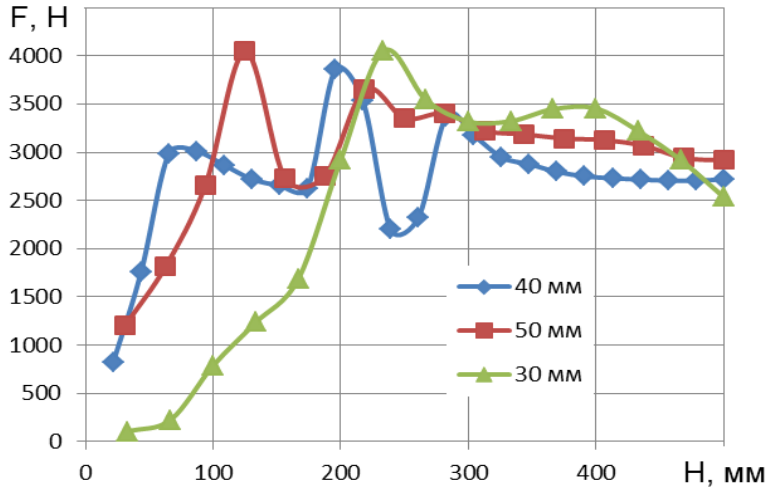


Рис. 6 - Залежність зусилля F заглиблення робочого органу від глибини його проникнення H для відповідних його діаметрів

Аналіз отриманих графіків показує, що зусилля заглиблення досягає максимального значення на глибині від 15 см до 25 см. Хоча максимальні значення твердості ґрунту згідно **рис. 5** відповідає глибині 25-40 см. Очевидно, що таке відхилення спричинене утворенням ущільненого конусу під робочим органом, який починає рух у внутрішню порожнину зуба лише після досягнення значень зусилля у межах 3800-4000 Н.

Також експериментальні значення вказують, що максимальне зусилля у 4000 Н виникає при заглибленні робочих органів діаметром 30 мм та 50 мм, а найменше максимальне зусилля у 3800 Н – для робочого органу діаметром 40 мм. Очевидно, що при діаметрі 30 мм виникає більший опір заповненню внутрішньої порожнини зуба ніж для діаметру 40 мм. Тому для практичного використання доцільно рекомендувати саме робочий орган із діаметром 40 мм.

Максимальне значення зусилля заглиблення робочого у 4000 Н відповідає максимальному значення твердості ґрунту отриманого у результаті його дослідження твердоміром у 60 кг/см^2 (див **рис. 5**). Адже для площі поперечного січення робочого органу діаметром 30 мм зусилля опору складе 4239 Н. Що свідчить про адекватність отриманих експериментальних досліджень.

ВИСНОВКИ

Найбільш ефективним і доступним способом розпушення підорного переущільненого шару ґрунту є використання глибокорозпушувачів. Завдяки цьому формуються умови сприятливі для розвитку рослин та усуваються наслідки деградації ґрунту. Існуючі конструкції глибокорозпушувачів характеризуються високими енергетичним затратами на одиницю обробленої площі. Вони не передбачають можливості зміни глибини обробітку у режимі реального часу на основі картограм твердості ґрунтів. Вирішення таких технічних недоліків можна забезпечити шляхом застосування для руйнування цілісності переущільненого шару принципу прорізання отворів трубчастим робочим органом із переміщенням вирізаного ґрунту на поверхню поля.

Твердість ґрунту дослідної ділянки у верхньому горизонті (0-10 см) знаходилась у межах від 4 до 13,1 кг/см^2. У горизонті 10-25 см твердість складала 9,6-44,1 кг/см^2. На глибині 25-45 см спостерігалось різке зростання твердості до 61,6 кг/см^2, що свідчить про наявність критично переущільненого шару ґрунту. У горизонті 45-60 см твердості зменшувалась до 32,3-35 кг/см^2.

Встановлено, що максимальне зусилля у 4000 Н виникає при заглибленні трубчастих робочих органів діаметром 30 мм та 50 мм, а найменше максимальне зусилля у 3800 Н – для робочого органу діаметром 40 мм. Тому для практичного використання доцільно рекомендувати саме робочий орган із діаметром 40 мм. Адекватність отриманих експериментальних досліджень підтверджується тим, що максимальне значення зусилля заглиблення робочого у 4000 Н відповідає максимальному значення твердості ґрунту отриманого у результаті його дослідження твердоміром у 60 кг/см^2

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Макаренко, М. (n.d.) Глибоке розпушення ґрунту (*Deep soil loosening*). *АгроЕліта*. Retrieved September 28, 2026, from. URL: https://agroelita.info/hlyboke-rozpushennya-gruntu/.

Колюбакін, В. (n.d.) Без ґрунтів немає майбутнього (*There is no future without soil*). *Урядовий кур'єр.* September 25, 2026, from. https://ukurier.gov.ua/uk/articles/bez-gruntiv-nemaye-majbutnogo/.

Медведєв, В.В. (2004). Проблеми охорони ґрунтів (Problems of soil protection). *Вісник аграрної науки*, *№1*, 53-57.

Swan, A.D., Angus, J.F., Hart, A.B., Kirkegaard, J.A., Moroni, J.S., Oates, A.A., Poile, G.P., Peoples, M.B., Conyers, M.K. (2026) Variable responses of canola and cereals to deep ripping and liming of high-strength, acidic, subsurface soil layers. *Field Crops Research*, Vol. 347, 110645. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2026.110645.

Davies, S., Armstrong, R., Macdonald, L., Condon, J., Petersen, E. (2019) Soil constraints:a role for strategic deep tillage. *Australian Agriculture in 2020: From Conservation to Automation*, Graham Centre for Agricultural Innovation. 117-135.

Бромот, І. (n.d.) Глибокорозпушувач. Навіщо він мені потрібен *(Deep conditioner. Why do I need him)*. Retrieved April 28, 2026, from https://traktorist.ua/articles/883-glibokorozpushuvachi--vse-scho-treba-znati-pro-nih.

Гаврилов, С. (2015). Проблема плужної підошви у ґрунті та шляхи її вирішення (*The problem of the plow sole in the soil and ways to solve it)*. *Пропозиція*, *№10*, 70-73.

Грицишин, М., Перепелиця, Н., Сухина, А. Обробіток ґрунту та збереження його родючості *(Soil tillage and the preservation of soil fertility)*. Retrieved April 28, 2026, from https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-tekhnika-dlya-obrobitku-gruntu/obrobitok-gruntu-ta-zberezhennya.

Макаренко, М. (n.d.) Необхідність глибокого розпушення. *Агробізнес сьогодні.* Retrieved September 21, 2026, from https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/10504-neobkhidnist-hlybokoho-rozpushuvannia.html.

Bednar (n.d.). *Terraland TN* . Retrieved April 27, 2026, from https://www.bednar.com/en/terraland-tn/.

Gregoire-besson (n.d.) *Helios*. Retrieved April 27, 2026, from https://www.gregoire-besson.com/ua/machines/helios

Greatplain (n.d.). *Sub-soiler.* Retrieved September 7, 2026, from https://www.greatplainsag.com/uk/products/709/sub-soiler.

Wil-rich (n.d.). *Rippers*. Retrieved September 7, 2026, from https://www.wil-rich.com/primary-tillage/rippers/357-inline-ripper/.

Jympa (n.d.). Subsoilers. Retrieved September 12, 2026, from https://jympa.com/en/subsoilers/.

Голій, О. & Цизь, І. (2024) Аналітичний огляд конструкцій машин для глибокого розпушення ґрунту (Analytical review of designs of machines for deep soil loosening). *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології агропромислового виробництва»,* 72-74.

Цизь, І.Є. & Голій, В.О. (2024a). Обґрунтування конструкції та дослідження тягового опору робочого органу знаряддя для глибокого розпушення ґрунту (Substantiation of the design and study of the traction resistance of the working body of the tool for deep soil loosening). *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, №1(22), 337-348.

Цизь, І.Є. & Голій, В.О. (2024b). Результати дослідження твердості ґрунту полів ДПЕДГ «ЕЛІТА» (Results of research of soil hardness of fields SEERF «Elita»). *Сільськогосподарські машини*, 50, 25-36.

Марченко, Н. (n.d.) Інноваційні технології обробітку ґрунту. *Landlord*. September 15, 2026, from https://landlord.ua/agrolife-en/innovatsijni-metodi-obrobitku-gruntu/.

Spoor, G., Godwin, R.J. (1978) An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *J. agrics. Engng Res.* 23, 243-258.

Soane, G.C., Godwin, R.J. Spoor, G. (1986) Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure. *Soil & Tillage Research*, no. 8, 231-237. https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90336-3.

Tesliuk, H., Volik, B., Sokol, S., & Ponomarenko, N. (2019). Design of working bodies for tillage tools using the methods of bionics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *3*(1 (99), 49–54. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169156.

Волик Б.А., Теслюк Г.В., Коновий А.В. (2020) Обґрунтування конструктивних параметрів глибокорозпушувача ґрунту *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: *матеріали II Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф*. Мелітополь, ТДАТУ, 60–63.

Kravets, S.V., Lukianchuk, O.P., Nechydyuk, A.A.. (2021) Determination of the critical depth of soil cutting for earthmoving machines. *Perspective trajectory of scientific research in technical sciences: Collective monograph*, Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 235-270. http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/138.

Голій, О.В. (2025). Машина для диференційованого за глибиною обробітку ґрунту (A machine for soil cultivation differentiated by depth). *Інноваційні технології в АПК: збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції*, 58-61.