

УДК 631.312; 631.316.22

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.225-237>

С.М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, **В.М. Сало**, проф., д-р техн. наук,
Д.І. Петренко, доц., канд. техн. наук, **В.А. Мельніченко**, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна
e-mail: leshchenkosm@kntu.kr.ua

Аналітичне обґрунтування основних параметрів комбінованого чизельного глибокорозпушувача

В роботі розглянуто проблему переущільнення орних ґрунтів України та шляхи її вирішення за рахунок застосування комбінованих чизельних знарядь. Розроблено математичну модель взаємодії робочих органів з ґрунтовым середовищем з урахуванням ефекту Ребіндера та реологічних властивостей ґрунту. Отримана інтегральна залежність питомого опору при роботі чизельної лапи підтверджує, що зниження загального тягового опору досягається завдяки спеціалізації функцій деформаторів та їх адаптації до різних середовищ. Підвищення ефективності роботи робочих органів комбінованих глибокорозпушувачів досягається за рахунок мінімізації в'язкого опору долота через обмеження робочої швидкості; зниження латерального опору стояка через його тонку, прямолінійну форму та ефективну роботу зуба; використання енергії вторинного руйнування (робота крил у фрагментованому середовищі) для досягнення мінімального зростання опору за рахунок раціоналізації кута встановлення крил.
глибокорозпушувач, чизельні лапи, якість кришення ґрунту, тяговий опір, реологічні властивості, конструктивні параметри, енергоємність процесу

Постановка проблеми. Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва в Україні призвела до значного погіршення фізичних властивостей орних ґрунтів. За даними Національної академії аграрних наук України, понад 65% агропромислових угідь характеризуються підвищеною щільністю орного горизонту та підорного шару, що перевищує допустимі значення цих показників на 15...25%. Зазначене явище, відоме як переущільнення ґрунту, є наслідком тривалого використання метало- і енергоємної сільськогосподарської техніки та недостатнього застосування технологій глибокого обробітку ґрунту [1, 2, 8].

Переущільнення підорного горизонту на глибині 25...45 см ускладнює розвиток кореневої системи сільськогосподарських культур, порушує водно-повітряний режим та знижує біологічну активність ґрунту [3]. Дослідження показують, що на переущільнених ґрунтах врожайність основних культур знижується на 20...35% порівняно з оптимальними умовами.

Глибоке розпушування є ефективним агротехнічним прийомом відновлення заданої структури та щільності ґрунту. Однак, традиційні конструкції глибокорозпушувачів характеризуються високою енергоємністю процесу, що обмежує їх широке застосування в сільськогосподарському виробництві. Питомий тяговий опір класичних чизельних глибокорозпушувачів при роботі на глибині 35...40 см становить 30...45 кН/м², що вимагає використання енергонасичених тракторів потужністю понад 200 к.с. [1, 9, 13].

Основною проблемою сучасного глибокого обробітку ґрунту є невідповідність між агротехнічними вимогами до глибини розпушування (35...45 см) та технічними можливостями існуючого парку енергетичних засобів. За статистичними даними, середня потужність тракторів, що експлуатуються в Україні, становить 100...150 к.с., що недостатньо для ефективної роботи більшості серійних глибокорозпушувачів.

Аналіз конструкцій та результатів використання існуючих глибокорозпушувачів підтверджує [9, 13], що основними джерелами енергетичних витрат є:

- опір деформації та руйнування суцільного ґрунтового середовища (40...50% загальних витрат);
- тертя робочих поверхонь об ґрунт (30...40%);
- надання кінетичної енергії ґрунтовим агрегатам (10...15%);
- подрібнення великих грудок (5...10%).

Традиційні підходи до зниження тягового опору, що включають зменшення ширини захвату робочих органів, оптимізацію кутів їх встановлення та застосування високоміцних матеріалів, дозволяють знизити енергоємність лише на 8...12%. Це свідчить про необхідність пошуку принципово нових конструктивних рішень, що базуються на розумінні фізико-механічних процесів взаємодії робочих органів з ґрунтовим середовищем під час проведення обробітку ґрунту.

Значної уваги потребує моделювання взаємодії робочих органів з урахуванням реологічних властивостей ґрунту, ефектів фізико-хімічної механіки та особливостей руйнування як суцільного, так і попередньо розпушеного (агрегованого) середовища. Існуючі моделі, що базуються переважно на статичному підході та не враховують в'язкопружнопластичні властивості ґрунту, не забезпечують достатньої точності прогнозування.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Фундаментальні дослідження взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин з ґрунтом були закладені ще в роботах В.П. Горячкіна, який сформулював загальне рівняння тягового опору ґрунтообробних знарядь. Згідно з теорією Горячкіна, загальний опір складається з трьох компонент: опору на різання та деформацію ґрунту, опору тертя та інерційного опору. Такий класичний підхід створив основу для подальших досліджень у галузі механіки ґрунтів [3, 5].

Значний внесок у розвиток теорії різання ґрунтів зробив В.А. Желіговський, який запропонував модель, що враховує зчеплення та внутрішнє тертя ґрунту. Модель Желіговського використовує коефіцієнт опору різання, що залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту та геометрії робочого органу. Ця модель знайшла широке застосування при розрахунку опору чизельних робочих органів [7, 10].

Л.В. Гячев розвинув теорію різання ґрунтів землерийними машинами, адаптувавши підходи будівельної механіки до сільськогосподарських машин. У його роботах детально розглянуто процеси утворення зон деформації перед робочими органами та механізми руйнування ґрунту різної щільності.

Теорія граничної рівноваги сипучих та зв'язних середовищ, розроблена на основі критерію міцності Кулона-Мора, дозволяє визначати напружений стан ґрунту під дією зовнішніх навантажень. Ця теорія широко використовується для аналізу взаємодії робочих органів з ґрунтом під час їх руху на певній глибині [5, 6]. Дослідження А.Н. Зеленина показали, що коефіцієнти бокового тиску ґрунту, визначені за теорією Ранкіна, добре узгоджуються з експериментальними даними для більшості типів ґрунтів.

Значний внесок у розуміння процесів деформації та руйнування ґрунтів забезпечили роботи П.А. Ребіндера з фізико-хімічної механіки. Ефект Ребіндера полягає в зниженні міцності твердих тіл при адсорбції поверхнево-активних речовин [3, 6]. Для ґрунтів найважливішою поверхнево-активною речовиною є вода, адсорбція якої призводить до зменшення зчеплення між частинками.

Є.Д. Щукін продовжив дослідження впливу середовища на міцність твердих тіл та показав, що ефект зниження міцності може досягати 40–50% залежно від типу

грунту та вологості. Ці результати мають принципове значення для обґрунтування оптимальних термінів та умов проведення глибокого обробітку ґрунту [11].

І.Б. Ревут у своїх роботах з фізики ґрунтів детально дослідив вплив вологості на фізико-механічні властивості ґрунту, включаючи зчеплення, внутрішнє тертя та деформаційні характеристики. Встановлено, що оптимальна вологість для обробітку чорноземних ґрунтів становить 18...24%, при якій досягається мінімальний опір деформації.

С.С. Вялов заклав основи реологічного підходу до механіки ґрунтів, розглядаючи ґрунт як складне в'язкопружнопластичне середовище. Згідно з його моделлю, загальна деформація ґрунту складається з пружної, в'язкої та пластичної компонент, кожна з яких має свої характерні часи релаксації [9].

Н.А. Цитович розвинув реологічний підхід для мерзлих та талих ґрунтів, запропонувавши узагальнену модель Максвелла-Кельвіна. Ця модель враховує залежність механічних властивостей ґрунту від швидкості деформації, що особливо важливо при динамічному навантаженні від рухомих робочих органів.

І.М. Панов та В.І. Ветохін адаптували реологічні моделі для задач сільськогосподарського глибокого обробітку ґрунту. Їхні дослідження показали, що врахування в'язких властивостей ґрунту дозволяє на 10...15% точніше прогнозувати тяговий опір при різних швидкостях руху агрегату [10].

Сучасні підходи до математичного моделювання взаємодії робочих органів з ґрунтом включають наступні методи.

Аналітичні методи, що базуються на теоріях механіки суцільного середовища, граничної рівноваги та реології. Ці методи дозволяють отримати замкнені аналітичні вирази для тягового опору, але вимагають значних спрощень щодо геометрії робочих органів та властивостей ґрунту.

Чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ) та метод дискретних елементів (МДЕ). МСЕ ефективний для моделювання континуального деформування ґрунту, тоді як МДЕ краще описує процеси руйнування та утворення окремих агрегатів. Проте чисельні методи потребують значних обчислювальних ресурсів та точного калібрування параметрів моделі.

Гібридні підходи, що поєднують аналітичні та чисельні методи, є найбільш перспективними для інженерних розрахунків. Аналітичні моделі використовуються для швидкої оцінки основних параметрів, а чисельні – для уточнення в критичних зонах.

Аналіз наукової літератури [3, 5, 6, 9] показує, що, незважаючи на значний обсяг досліджень, залишаються недостатньо вивченими наступні аспекти:

1. Взаємодія вертикальних та горизонтальних деформаторів. Більшість моделей розглядають вплив окремих елементів конструкції незалежно, не враховуючи їх взаємного впливу на напружено-деформований стан ґрунту.

2. Перехід від суцільного до агрегованого середовища. Робочі органи, розташовані послідовно, працюють в різних умовах: перший контактує з недеформованим ґрунтом, наступні – з попередньо розпушеним. Математичні моделі цього переходу потребують подальшого розвитку.

3. Реологічні ефекти при високих швидкостях деформації. Існуючі реологічні моделі переважно розроблені для статичного або квазістатичного навантаження. Їх застосовність при швидкостях руху 2...3 м/с потребує експериментального підтвердження.

4. Оптимізація форми крил. Хоча загальні принципи впливу форми на опір відомі, кількісні залежності для конкретних геометрій, зокрема обтічної форми типу «хвіст дельфіна», недостатньо вивчені.

5. Комплексний енергетичний аналіз. Розподіл загальної енергії між різними процесами (деформація, тертя, прискорення, руйнування) вивчений лише попередньо. Кількісної оцінки для чизельних глибокорозпушувачів зі складними формами крил не отримано.

Отже, зазначені проблеми визначають необхідність проведення комплексних досліджень, направлених на створення узагальненої математичної моделі, що враховує всі основні фактори та може бути використана для оптимізації конструктивних параметрів комбінованих глибокорозпушувачів із різним набором основних та додаткових робочих органів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка комплексної моделі взаємодії робочих органів комбінованого чизельного глибокорозпушувача, що враховує фізико-хімічні, механічні та реологічні особливості процесу для обґрунтування конструктивних параметрів та режимів роботи ґрунтообробного агрегату.

Виклад основного матеріалу. Процес глибокого розпушування староорних переушільнених ґрунтів супроводжується складними фізико-хімічними та механічними явищами, що відбуваються в зоні контакту робочих органів з ґрунтовим середовищем. Одним із головних факторів, які визначають енергоємність всього процесу, є вологість ґрунту та пов'язаний з нею ефект Ребіндера [3, 6].

Ефект Ребіндера (адсорбційне зниження міцності) полягає в зменшенні поверхневої енергії твердого тіла при адсорбції поверхнево-активних речовин, зокрема води. Для ґрунтів це виражається у зниженні зчеплення між структурними агрегатами при зміні вологості. Згідно з дослідженнями П.А. Ребіндера та Є.Д. Щукіна [9], міцність твердого тіла при адсорбції знижується на 20...50% залежно від природи адсорбату та адсорбента.

Математично ефект Ребіндера для ґрунтів можна описати залежністю ефективного зчеплення від вологості

$$c_{ef} = c_0 \cdot K_p,$$

де c_{ef} – ефективне зчеплення ґрунту, Па;

c_0 – початкове зчеплення сухого ґрунту, Па;

K_p – коефіцієнт Ребіндера, що враховує вплив вологості, який в свою чергу знаходиться за формулою

$$K_p = 1 - \alpha \cdot \exp \left[- \frac{(W - W_{opt})^2}{\beta^2} \right],$$

де W – поточна вологість ґрунту, %;

W_{opt} – оптимальна вологість, при якій зчеплення мінімальне, %;

α – коефіцієнт інтенсивності ефекту ($\alpha = 0,25 \dots 0,35$);

β – параметр ширини діапазону вологості ($\beta = 4 \dots 6$ %).

Експериментальні дослідження підтверджують, що для типових чорноземів України оптимальна вологість становить 20...24%, при якій зчеплення знижується на 25...30% порівняно з повітряно-сухим станом [17].

Поведінка ґрунту під дією зовнішніх навантажень від робочих органів описується теорією граничної рівноваги, що базується на критерії міцності Кулона-Мора [9]. Цей критерій встановлює умову руйнування ґрунту через співвідношення нормальних і дотичних напружень на площині можливого зсуву, що має загальний вигляд

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

де τ – граничне дотичне напруження на площині зсуву, Па;

c – зчеплення ґрунту, Па;

σ – нормальне напруження на площині зсуву, Па;

φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, град.

Для аналізу взаємодії робочих органів з ґрунтом важливим є визначення коефіцієнтів бокового тиску ґрунту. За теорією Ранкіна, коефіцієнт пасивного тиску (коли ґрунт чинить опір стисненню) визначається як

$$K_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Коефіцієнт активного тиску можна знайти, використовуючи залежність

$$K_a = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}.$$

Для ґрунтів з кутом внутрішнього тертя $\varphi = 25 \dots 30^\circ$ коефіцієнт пасивного тиску складає $K_p = 2,5 \dots 3,0$, а активного – $K_a = 0,33 \dots 0,40$.

Критичне дотичне напруження на глибині обробітку h дорівнює

$$\tau_{кр} = c_{ef} + \gamma \cdot h \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

де γ – об'ємна вага ґрунту, Н/м³;

h – глибина розпушування, м.

Враховуючи залежність ефективного зчеплення від вологості та значення коефіцієнту Ребіндера, отримаємо загальну формулу для визначення критичного дотичного напруження на заданій глибині обробітку

$$\tau_{кр} = c_0 \cdot \left[1 - \alpha \cdot \exp \left[- \frac{(W - W_{om})^2}{\beta^2} \right] \right] + \gamma \cdot h \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Ґрунт є складним багатофазним середовищем, що проявляє одночасно пружні, в'язкі та пластичні властивості [6, 14]. Для опису його поведінки під навантаженням використовується модель пружно-в'язко-пластичних тіл (модель Максвелла-Кельвіна), згідно із якою загальна деформація ґрунту

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v + \varepsilon_p,$$

де ε_e – пружна (оборотна) деформація;

ε_v – в'язка деформація;

ε_p – пластична (необоротна) деформація.

При моделюванні роботи комбінованого чизельного глибокорозпушувача, зокрема його первинних деформаторів (долото), які контактують із незрушеним, злежаним ґрунтом, ці складові мають наведене нижче фізичне та аналітичне пояснення.

Пружна деформація (Закон Гука) описує миттєву, зворотну деформацію, яка виникає одразу після прикладення навантаження і зникає одразу після його зняття, що має вигляд

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E},$$

де E – модуль пружності (або модуль Юнга) ґрунту, який фактично є мірою жорсткості матеріалу, Па. Високе значення модулю пружності означає, що ґрунт дуже жорсткий і мало деформується під напруженням.

Велика пружна деформація ε_e вказує на те, що значна частина енергії, витраченої на стиснення ґрунту, буде втрачена на його зворотне розширення, зменшуючи ефективність руйнування ґрунтообробними робочими органами [4].

В'язка деформація описує залежну від часу, інерційну та рідинно-подібну зміну форми ґрунту, яка є характерною для вологих, зв'язних ґрунтів (реологічна модель Бінгама-Шведова). Вона пов'язана з внутрішнім тертям та в'язким опором переміщенню ґрунтових частинок та вологи.

В'язка деформація ε_v описується через швидкість деформації $\dot{\varepsilon}_v$ і залежить від в'язкості η та напруження σ , що перевищує межу плинності σ_y

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{d\varepsilon_v}{dt} = \frac{\sigma - \sigma_y}{\eta}.$$

Звідси, інтегруючи за часом t , можна отримати

$$\varepsilon_v = \frac{(\sigma - \sigma_y)}{\eta} \cdot t = \frac{(\sigma - \sigma_y)}{\eta} \cdot \frac{L}{V_{agr}},$$

де σ_y – межа плинності ґрунту;

η – в'язкість ґрунту;

L – довжина контакту робочого органа з ґрунтом (аналог часу t за умови $t = \frac{L}{V_{agr}}$);

V_{agr} – швидкість руху агрегату.

Вплив на роботу чизельного глибокорозпушувача. Збільшення V_{agr} призводить до зростання в'язкої складової опору ($R_\eta \sim \eta \cdot V_{agr}$). Це є однією з причин, чому тяговий опір агрегатів для безполицевого обробітку зростає квадратично або навіть експоненційно при високих швидкостях роботи.

Пластична (необоротна) деформація ε_p це бажана, постійна, незворотна зміна форми та об'єму ґрунту, яка є результатом руйнування ущільненого шару (сколювання, зсув, розтріскування). Пластична деформація виникає, коли напруження σ досягає межі міцності ґрунту на зсув (критерій Мора-Кулона) і ґрунт переходить у стан граничної рівноваги. Саме ε_p відображає ефективність глибокого розпушування.

Пластична деформація виникає після досягнення напруженнями σ умови критерію граничної рівноваги. Для ґрунту це критерій Мора-Кулона

$$\tau_p = C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

де τ_p – гранична дотична напруга (напруга зсуву) в площині ковзання;

C – питома когезія (зчеплення);

σ_n – нормальне напруження в площині ковзання;

φ – кут внутрішнього тертя.

Пластична деформація ε_p – це кінцевий результат руйнування монолітів ґрунту вздовж поверхонь зсуву. Вона пов'язана з витраченою енергією на руйнування $A_{руйн}$:

$$\varepsilon_p \sim \frac{A_{руйн}}{\sigma_{гран}} \sim \frac{R_{руйн} \cdot L}{\sigma_{гран}},$$

де $R_{руйн}$ – опір руйнування (сума опорів долота та крил);

$\sigma_{\text{гран}}$ – середня гранична напруга в зоні руйнування.

Особливості для роботи чизельних лап комбінованого глибокорозпушувача:

1. Первинний етап (ε_{p1}): Долото ініціює руйнування у суцільному середовищі, створюючи зони пластичного зсуву (сколювання) під кутом θ . Величина ε_{p1} в такому випадку залежить від міцності ґрунту C і кута тертя φ .

2. Вторинний етап (ε_{p2}): Крила забезпечують додаткове горизонтальне розтріскування і пластичне подрібнення (переміщення) у виділеному ними середовищі ґрунту. Величина ε_{p2} залежить від енергії, необхідної для руйнування агрегатів ґрунту, що є меншою, ніж у суцільному середовищі. Обтічна (опукла чи увігнуто-опукла) форма крила оптимізує цей пластичний потік ґрунту, спрямовуючи його для максимального сколювання з мінімальними витратами енергії [17, 19].

Загальна деформація ґрунту ε в зоні дії первинних деформаторів (долота) чизеля є сумою цих складових, де пластична деформація ε_p є цільовою:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{(\sigma - \sigma_y)}{\eta} \cdot \frac{L}{V_{\text{агр}}} + \varepsilon_p(\tau_p, C, \varphi).$$

Отже, можна підтвердити, що для досягнення максимальної ефективності розпушування потрібно, щоб складові ε_e та ε_v були якнайменші, при цьому ε_p повинна бути максимальною. Мінімізація в'язкої деформації ε_v вимагає вибору раціональної робочої швидкості $V_{\text{опт}}$, щоб уникнути надмірного в'язкого опору. Максимізація пластичної деформації ε_p може бути досягнута за рахунок пошуку оптимальної геометрії долота і крил чизельної лапи, що забезпечує перевищення граничної напруги зсуву τ_p по всьому об'єму зрушеного ґрунту. Узагальнений графік розподілу напружень перед чизельною лапою наведено на рис. 1.

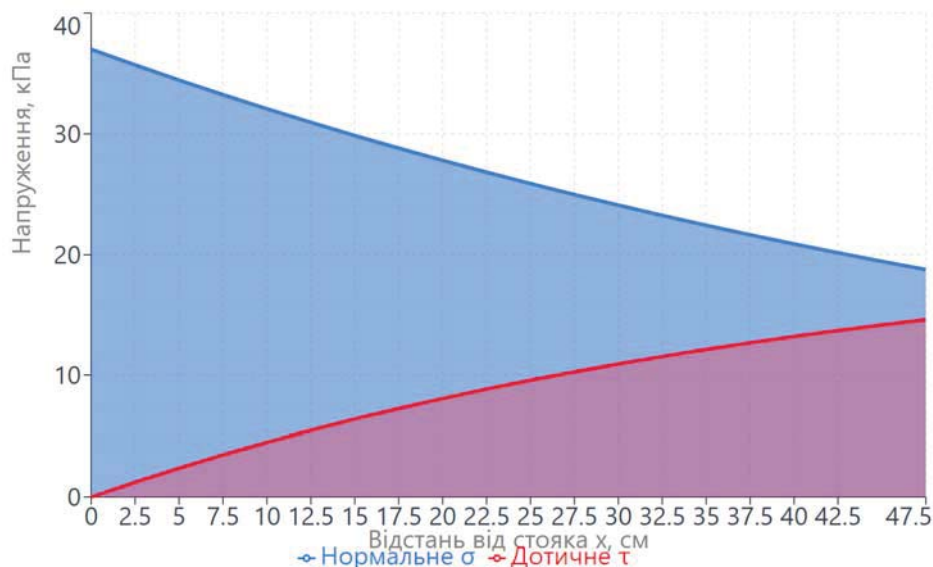


Рисунок 1 – Розподіл напружень перед робочим органом (чизельною лапою)

Джерело: розроблено авторами із використанням [3]

Під час роботи чизельної лапи в ґрунтовому середовищі [16, 17, 18] концептуально розрахункову схему взаємодії можна розділити на три зони:

1. Зона I (первинне руйнування), на цьому етапі відбувається безпосередня взаємодія долота з необробленим, пружно-пластичним середовищем на максимальній глибині обробітку H . За таких умов роботи домінує сколювання та різ.

2. Зона II (розсовування та відведення), має місце взаємодія стояка та зуба з ґрунтом. За таких умов роботи стояк розсовує ґрунт, що знаходиться під високим латеральним (бічним) тиском, а зуб відводить рештки та попередньо зрушений ґрунт від стояка.

3. Зона III (вторинне руйнування), коли спостерігається активна взаємодія крил з попередньо зрушеним ґрунтом (середовище з окремих агрегатів). На цьому етапі переважають горизонтальне розтріскування, подрібнення грудок та вирівнювання дна борозни.

Узагальнений розподіл функцій та середовищ контакту деформаторів чизельної лапи представлено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1 – Розподіл функцій та середовищ контакту деформаторів чизельної лапи

Конструктивні елементи (деформатори) чизельної лапи	Функція деформатора	Зона взаємодії	Характер середовища
Долото	Первинне сколювання, різання	I (Глибокий шар)	Пружно-пластичне (незрушене)
Стояк	Кріплення всіх елементів, розсування ґрунту	II (Вся глибина розпушування)	Високий латеральний тиск
Зуб	Відведення решток, напрямом потоку	II (Поверхневий/глибокий шар)	Фрагментоване/Незрушене
Крила	Вторинне розтріскування, подрібнення	III (Глибокий шар, після долота)	Фрагментоване (агрегати)

Джерело: розроблено авторами

Робота долота моделюється як рух клина в суцільному пружно-пластичному середовищі [14, 15]. Використовуємо для цього теорію граничної рівноваги ґрунту (наприклад, модель Прандтля-Терцагі, адаптована для сільськогосподарських знарядь). На опір $R_{\text{дол}}$ впливають не лише статичні властивості ґрунту (γ, C, φ), але й реологічні особливості (в'язкість η , час релаксації τ). При швидкому русі ґрунт проявляє пружні та в'язкі властивості. Кінцева залежність опору долота $R_{\text{дол}}$ матиме вигляд:

$$R_{\text{дол}} = A_{\text{дол}} \cdot [N_{\gamma} \cdot \gamma \cdot H + N_C \cdot C + N_{\eta} \cdot \eta \cdot V_{\text{агр}}],$$

де $A_{\text{дол}}$ – площа контакту долота в проекції на вертикальну площину;

N_{γ} , N_C , N_{η} – коефіцієнти врахування опору, що залежать від кута атаки α , кута внутрішнього тертя φ , а також від швидкості руху $V_{\text{агр}}$ (для N_{η});

$N_\eta \cdot \eta \cdot V_{agr}$ – складова, що враховує в'язкий опір (теорія Бінгама-Шведова). Зі зростанням швидкості, ця складова зростає лінійно, що підкреслює необхідність вибору оптимальної V_{agr} (8...10 км/год), щоб уникнути надмірного зростання опору.

Ефект Ребіндера (адсорбційне зниження міцності) передбачає, що поверхнево-активні речовини (наприклад, ґрунтова волога, що містить гумати) можуть знижувати міцність ґрунту, полегшуючи його руйнування. Хоча цей ефект важко моделювати безпосередньо, він аналітично обґрунтовує роботу при оптимальній вологості. Так, міцність зчеплення

$$\sigma_{зчеп} = f(\sigma_0, \psi),$$

де σ_0 – міцність у сухому стані;

ψ – поверхневий натяг (який знижується при оптимальній вологості).

Таким чином, ефективна когезія C у формулі для $R_{дол}$ знижується.

Стояк працює в умовах високого латерального тиску $\sigma_{лат}$, що виникає внаслідок руху клиноподібного робочого органу та ущільнення ґрунту в бокових зонах. Латеральний тиск $\sigma_{лат}$ на стояк визначається за допомогою теорії активного/пасивного тиску ґрунту. Для прямолінійного стояка, що розсуває ґрунт, тиск $\sigma_{лат}$ має характер пасивного тиску P_p , що зростає з глибиною:

$$\sigma_{лат}(h) = K_p \cdot \gamma \cdot h + 2 \cdot C \cdot \sqrt{K_p},$$

де $K_p = tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$ – коефіцієнт пасивного тиску ґрунту.

Опір стояка $R_{ст}$ та зуба $R_{зуб}$ описуються наступними залежностями:

$$R_{ст} = \int_0^H (\sigma_{лат}(h) \cdot \mu + \sigma_{лок}(h)) \cdot 2 \cdot L_{ст} \cdot dh;$$

$$R_{зуб} \approx R_{зуб}(тертя) + R_{зуб}(рештки).$$

Таким чином, зменшення опору стояка $R_{ст}$ досягається за рахунок мінімальної товщини стояка (зменшення $R_{лок}$), зниження коефіцієнта тертя μ (досягається за рахунок полірування або нанесення спеціального покриття) та ефективної роботи зуба, що створює захисну зону і відводить рештки, зменшуючи контактну площу $A_{конт}$ стояка з найбільш щільним ґрунтом.

Крила працюють у зоні, де ґрунт попередньо зрушений долотом і складається з окремих агрегатів. Це середовище має меншу когезію, але більшу анізотропію (неоднорідність). Робота крила – це вторинне руйнування (подрібнення грудок) та розповсюдження горизонтальних тріщин у ґрунті.

Вторинний опір $R_{крил}$ пов'язаний з енергією, необхідною для руйнування грудок, що контактують з поверхнею крила. Використовуючи енергетичний підхід руйнування (аналогічно теорії Ріттинґера або Кіка), можна записати

$$\Delta E_{подр} = \frac{R_{крил}(подрібн)}{V_{agr}} \cdot ds.$$

Крила діють як ущільнюючі та зсувні елементи на ґрунтові агрегати. Обтічна форма крила [18] спеціально використовується для забезпечення плавного, але інтенсивного зсуву агрегатів, що призводить до їхнього руйнування.

Для ефективного горизонтального розтріскування крило повинно створювати підймальну силу $F_{\text{підй}}$ та горизонтальний зсув $F_{\text{гориз}}$, які перевищують міцність ґрунту на розтягнення σ_t .

$$F_{\text{підй}} + F_{\text{гориз}} > \sigma_t \cdot A_{\text{крила}}.$$

Раціональний кут установки крила ζ створює умови, коли значна частина сили спрямована горизонтально $F_{\text{гориз}}$, що є енергетично вигіднішим, ніж вертикальне переміщення ґрунту.

Таким чином, кінцева інтегральна залежність питомого опору при роботі чизельної лапи має вигляд

$$r = \frac{1}{L_{\text{агр}}} \cdot \sum_{i=1}^N \left[R_{\text{дол}}(\alpha) + R_{\text{ст}}(\mu, L_{\text{ст}}) + R_{\text{крил}}(\zeta, B_{\text{крил}}) \right].$$

Таблиця 2 – Вплив кута установки крила ζ на енергетичний розподіл сили

Кут ζ	% $F_{\text{гориз}}$ (розтріскування)	% $F_{\text{підй}}$ (підйом ґрунту)	Якість роботи
5°	≈ 95%	≈ 5%	Максимальна енергоефективність, мінімальний підйом
15°	≈ 85%	≈ 15%	Оптимальний баланс, гарне розтріскування
30°	≈ 50%	≈ 50%	Високий опір, надмірний підйом ґрунту

Джерело: розроблено авторами

Отримана модель підтверджує, що зниження загального тягового опору $R_{\text{заг}}$ досягається завдяки спеціалізації функцій деформаторів та їх адаптації до різних середовищ: мінімізація в'язкого опору $N_{\eta} \cdot \eta \cdot V_{\text{агр}}$ долота через обмеження робочої швидкості; зниження латерального опору стояка через його тонку, прямолінійну форму та ефективну роботу зуба; використання енергії вторинного руйнування (робота крил у фрагментованому середовищі) для підвищення якості розпушування при мінімальному зростанні опору за рахунок оптимального кута ζ .

Висновки. 1. Проведений комплексний аналіз взаємодії робочих органів комбінованого чизельного глибокорозпушувача з ґрунтовим середовищем дозволив встановити наступне.

Фізико-механічні основи процесу – математично обґрунтовано вплив ефекту Ребіндера на зниження міцності ґрунту при оптимальній вологості (20...24%), що забезпечує зменшення зчеплення на 25...30% порівняно з повітряно-сухим станом.

Реологічні властивості ґрунту – доведено необхідність врахування пружної, в'язкої та пластичної складових деформації ґрунту при моделюванні процесу глибокого розпушування, що дозволяє на 10...15% точніше прогнозувати тяговий опір.

Спеціалізація функцій деформаторів – обґрунтовано розподіл робочих органів чизельної лапи на три функціональні зони: долото (первинне руйнування суцільного середовища), стояк та зуб (розсовування та відведення), крила (вторинне руйнування агрегованого середовища).

2. Обґрунтовано шляхи зниження тягового опору через: мінімізацію в'язкого опору долота шляхом обмеження робочої швидкості до раціональних значень (8...9,5 км/год); зниження латерального опору стояка завдяки його раціональній геометрії та ефективній роботі зуба; використання енергії вторинного руйнування через роботу крил у попередньо розпушеному (агрегованому) середовищі з оптимальним кутом установки (15°). Представлений підхід може використовуватися для моделювання і розрахунку тягового опору ґрунтообробних агрегатів, що дозволяє провести оптимізацію конструкції та знизити загальне енергоспоживання.

3. Отримані результати дозволяють створювати високоефективні комбіновані чизельні глибокорозпушувачі з науково обґрунтованими параметрами; знизити питомий тяговий опір при збереженні високої якості обробки ґрунту; забезпечити відновлення структури та щільності переущільнених староорних ґрунтів, що становлять понад 65% агропромислових угідь України.

4. Для комплексного вирішення проблеми енергоефективного глибокого обробки ґрунту необхідні додаткові дослідження, а саме: уточнення реологічних моделей для високих швидкостей деформації (2...3 м/с); дослідження форми крил і долота для різних типів ґрунтів та умов вологості; розробка гібридних підходів до математичного моделювання з поєднанням аналітичних та чисельних методів; комплексний енергетичний аналіз розподілу витрат енергії між окремими процесами обробки.

Список літератури

1. Машини для обробки ґрунту та внесення добрив. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей / Сало В.М. та ін. Х.: Мачулін, 2016. 244 с.
2. Гуков Я.С. Обробка ґрунту. Технологія і техніка. К., Нора-Принт, 1999. 275 с.
3. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. Київ: Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с.
4. Azizi, A., Gilandeh, Y. A., Mesri-Gundoshmian, T., Saleh-Bigdeli, A. A., & Moghaddam, H. A. (2020). Classification of soil aggregates: A novel approach based on deep learning. *Soil and Tillage Research*, 199, 104586. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104586>
5. Кобець А.С., Волик Б.А., Пугач А.М. Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок: монографія. Дніпропетровськ: Вид-во «Свидлер А.Л.», 2011. 140 с.
6. Ковбаса В.П. Механіко-технологічні основи взаємодії робочих органів з ґрунтом: монографія. Київ, 2016. 298 с.
7. Гуков Я.С. Обґрунтування деяких параметрів розпушувачів ґрунту. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2000. Вип. 83. С.84-88.
8. Машини для обробки ґрунту та сівби: посіб. / за ред. Кравчука В.І., Мельника Ю.Ф. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2009. 288 с.
9. Планування ґрунтообробних процесів на основі моделювання: монографія. / А. Тригуба та ін. Варшава, 2020. 138 с.
10. Ветохін В.І., Панов А.І. Деякі тенденції розвитку конструкцій робочих органів для чизельно-полицевого обробки ґрунту. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: зб наук. пр. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого*, 2013. Вип. 17(31), Кн.1. С.92-98.
11. Дубровін В.О., Теслюк В.В. Дослідження ефективності технології і техніки мінімізації весняного передпосівного обробки ґрунту під сівбу цукрових буряків. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2013. Вип. 185(1). С. 11-17.
12. Корабельський В.І., Спирін А.В., Ковальова І.М. Розробка серповидної стойки асиметричного чизеля. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2011. Вип. 6. С. 72-75. URL: <http://repository.vsau.org/getfile.php/3502.pdf> (дата звернення: 02.12.2025).
13. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини: підруч. Київ: Каравела, 2018. 552 с.

14. Zeng, Z., Ma, X., Chen, Y., & Qi, L. (2020). Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM). *Soil and Tillage Research*, 197, 104505.
15. Spoor G., Godwin R.J. Fundamentals of cultivator design and performance . *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2019. Vol. 43, № 2. P. 147-165.
16. Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting / K.V. Vasylykivska, S.M. Leshchenko, O.M. Vasylykovskiy, D.I. Petrenko . *INMATEH-Agricultural Engineering* 2016. Vol.50, No.3. P.13-20 ref.18.
17. Лещенко С.М. Сало В.М., Петренко Д.І. Експериментальна оцінка якості роботи комбінованого чизеля з додатковими горизонтальними та вертикальними деформаторами . *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків, 2015. Вип. 156. Механізація сільського господарства. С. 25-34.
18. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Оцінка енергоємності глибокого обробітку ґрунту комбінованими чизельними глибокорозпушувачами . *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць Центральноукраїнського нац. техн. ун-ту*. 2018. Вип. 31. С. 10–20.
19. Визначення параметрів та ефективність роботи додаткових робочих органів глибокорозпушувачів. / Лещенко С.М., Сало В.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2022. Вип. 52. С. 108-117. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.108-117>

Referencis

1. Salo, V.M., Leshhenko, S.M., Luzan, P.G., Machok, Yu.V., & Bogatir`ov, D.V. (2016). *Tillage and fertilizer machines. A textbook for students of agricultural specialties*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].
2. Hukov, Ya.S. (1999). *Tillage of the soil. Technology and equipment*. Kyiv, Nora-Prynt. [in Ukrainian].
3. Shevchenko, I.A. (2016). *Management of Agrophysical Condition of Soil Environment*. Kyiv: Vidavnichij dim «Vinichenko» [in Ukrainian].
4. Azizi, A., Gilandeh, Y. A., Mesri-Gundoshmian, T., Saleh-Bigdeli, A. A., & Moghaddam, H. A. (2020). *Classification of soil aggregates: A novel approach based on deep learning*. *Soil and Tillage Research*, 199, 104586. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104586> [in English].
5. Kobets, A.S., Volyk, B.A., & Puhach, A.M. (2011). *Soil cultivation machines: Theory, design, calculation*. Dnipropetrovsk : Svydler A.L. [in Ukrainian].
6. Kovbasa, V.P. (2016). *Mechanical and technological principles of interaction between working bodies and soil.* Kyiv. [in Ukrainian].
7. Hukov Ya.S. (2000). Justification of some parameters of soil looseners. *Mekhanizatsiia ta elektrifikatsiia silskoho hospodarstva*. 83, 84-88 [in Ukrainian].
8. Kravchuk, V.I., & Melnyk, Yu.F. (2009). *Manual. Machines for soil cultivation and seeding*. Doslidnytske: UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. [in Ukrainian].
9. Tryhuba, A., Hutsol, T., Mudryk, K., Nurek, T., Golebiewski, J., Lub, P., Glowacki, S., Sharybura, A.O., Tryhuba, I., Kucher, O., Mykhailova, L. & Rud, A. (2020). *Planning of soil-based processes based on modeling*. Warszawa. [in Ukrainian].
10. Vetokhin, V. I., & Panov, A. I. (2013). Some trends in the development of working bodies designs for chisel-plow tillage. *Tekhniko-tehnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniki i tekhnologiy dlya sil'skoho hospodarstva Ukrainy : Zbirnyk nauk. pr.*, 17(31), 1, 92-98. [in Ukrainian].
11. Dubrovin, V.O., & Tesliuk, V.V. (2013). Study of the efficiency of the technology and technique of minimizing the spring pre-sowing tillage for sowing sugar beets. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK*, 185(1), 10–20. [in Ukrainian].
12. Korabelskiy, V.I., Spirin, A.V., & Kovalova, I.M. (2011). Development of a sickle-shaped rack of an asymmetric chisel. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho aharnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. Vinnytsia: VNAU*, 6, 72-75. <http://repository.vsau.org/getfile.php/3502.pdf> [in Ukrainian].
13. Voitiuk, D.H., & Havryliuk, H.R. (2018). *Agricultural machinery*. Kyiv: Karavela [in Ukrainian].
14. Zeng, Z., Ma, X., Chen, Y., & Qi, L. (2020). Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM). *Soil and Tillage Research*, 197, 104505. [in English].
15. Spoor, G., & Godwin, R. J. (2019). Fundamentals of cultivator design and performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 43(2), 147-165. [in English].

16. Vasytkovska, K.V., Leshchenko, S.M., Vasytkovskyi, O.M., & Petrenko, D.I. (2016). Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 50, No.3, 13-20 [in English].
17. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., & Petrenko, D.I. (2015). Experimental assessment of the quality of work of a combined chisel with additional horizontal and vertical deformers. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 156. *Mekhanizatsiia silskoho hospodarstva*, 25-34. [in Ukrainian].
18. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., & Petrenko, D.I. (2018). Assessment of energy intensity of deep cultivation of soil by combined chisel deep tillers. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentralnoukrainskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*. 31, 10–20. [in Ukrainian].
19. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., Vasytkovskyi, O.M., & Petrenko, D.I. (2022). Determination of parameters and efficiency of additional operating parts of deep tillers. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh.mizhvid.nauk.-tekhn. zb.* 52, 108-117. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.108-117> [in Ukrainian].

Sergii Leshchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Salo**, Prof., DSc., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Melnychenko**, PhD student

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analytical Substantiation of the Main Parameters of a Combined Chisel Deep Ripper

The purpose of this work is to develop a comprehensive mathematical model of the interaction between the working components of a combined chisel deep ripper and the soil medium, considering the physical, chemical, mechanical, and rheological features of the deep ripping process. The study is aimed at the scientific substantiation of the structural parameters and operating modes of the tillage implement to improve the efficiency of processing compacted long-tilled soils while reducing energy consumption and ensuring the adaptation of deep rippers to the available fleet of medium-power tractors.

A comprehensive analysis of the problem of subsoil horizon compaction at a depth of 25-45 cm was conducted in this work, a problem that affects over 65% of Ukraine's agro-industrial land and leads to a yield reduction of 20-35%. An analytical model of the deep ripping process was developed, incorporating the Rehbinder effect, which ensures a 25-30% reduction in soil strength at an optimal moisture content of 20-24%. The influence of the soil's rheological properties was mathematically substantiated using the Maxwell-Kelvin model, which accounts for the elastic, viscous, and plastic components of deformation.

The research results demonstrate the feasibility of creating energy-efficient combined chisel deep rippers with scientifically substantiated parameters that ensure high quality soil processing with reduced energy intensity of the process. The developed mathematical model considers the specialization of the functions of the deformation elements of the chisel share and their adaptation to various soil media: the point (blade tip) operates in a continuous elastic-plastic medium, while the wings operate in a previously loosened, aggregated medium. The determined rational parameters allow for the adaptation of deep rippers to 100-150 hp tractors, which constitute the core of Ukraine's machine and tractor fleet. The implementation of the developed solutions will contribute to the restoration of the structure and density of compacted soils, increase crop yields, and reduce operating costs for deep tillage.

chisel plow, chisel shanks, soil crumbling quality, draft resistance, rheological properties, structural parameters, process energy intensity

Одержано (Received) 08.12.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2025