

background of the field. The relevance of the study is due to the need to increase the productivity of mobile energy vehicles, reduce energy consumption and minimize the negative impact of running systems on the soil environment in the context of the introduction of precision agriculture technologies. Modern approaches to adapting the running system parameters depending on the physical and mechanical properties of the soil, in particular its density, humidity, bearing capacity and mechanical composition, are analyzed. The purpose of the study is to analyze the structural and technological parameters of the adaptive running system of a mobile energy vehicle and determine their influence on traction and energy, technological and agroecological indicators of the machine-tractor unit.

To achieve the goal, the methods of analysis and generalization of scientific sources, system analysis, elements of terramechanics and mechanics of interaction of movers with the soil were used. In the work, it was established that the internal pressure in the tires, the contact area of the driver with the ground, the load distribution between the axles, the skid coefficient and the speed of the unit have the greatest influence on the efficiency of the operation of the mobile energy vehicle. The conducted analysis confirmed that the adaptive regulation of these parameters ensures a decrease in the specific pressure on the soil, improvement of the traction and traction characteristics, an increase in the coefficient of use of the traction force and a decrease in the specific fuel consumption. Structural diagrams of the interaction of the running system with the soil environment have been developed, which reflect the relationship between structural parameters, physical and mechanical properties of the agricultural background of the field and indicators of the efficiency of the unit.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of their use during the design of promising adaptive running systems of tractors and self-propelled machines, improvement of precision farming technologies and the creation of automated control systems for mobile energy means. The proposed approach helps increase the efficiency of field work, preserve soil fertility, and develop intelligent systems for managing agricultural machinery.

adaptive running system; mobile power tool; parameters; traction and adhesion properties; skid; contact pressure; soil compaction

Одержано (Received) 17.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 22.06.2026

УДК 631.312; 631.316.22

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.185-198>

С. М. Лещенко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна

e-mail: leshchenkosm@kntu.kr.ua

Технологічна модель глибокого розпушування ґрунту

В роботі розглянуто технологічну модель глибокого розпушування ґрунту чизельними робочими органами, яка об'єднує фізико-механічний, енергетичний і структурно-функціональний рівні взаємодії знаряддя з ґрунтом. В роботі запропоновано аналітичний зв'язок між критичною глибиною розпушування та інтенсивністю стохастичного марківського процесу подрібнення ґрунту через безрозмірний коефіцієнт відносної глибини і функцію частки корисної енергії. Отримана на цій основі залежність ступеня кришення ґрунту теоретично пояснює, чому раціональна робоча глибина перебуває в межах критичної глибини, а не наближається до максимально можливої і узгоджується з відомим експериментальним фактом зниження ступеня подрібнення ґрунту чизельними знаряддями при перевищенні раціональної глибини обробітку.

чизельний робочий орган, глибоке розпушування ґрунту, технологічна модель, критична глибина, тяговий опір, ступінь кришення ґрунту

Постановка проблеми. У системах ресурсозберігаючого та ґрунтозахисного землеробства, які набувають дедалі більшого поширення в умовах подальшої інтенсифікації аграрного виробництва України, основний безполицевий обробіток ґрунту слід розглядати як технологічну операцію, що дозволяє поєднати достатню глибину розпушування з мінімальним порушенням природної будови оброблюваних гумусовмісних горизонтів [1, 2]. Постійне та системне використання важких сільськогосподарських машин і знарядь призводить до утворення в підорному шарі стійких ущільнених зон (плужної підшви), які обмежують вологопроникність, аерацію та розвиток кореневої системи рослин [3]. У такому випадку хоча б періодичне глибоке (понад 30 см) розпушування ґрунту без обертання скиби є практично єдиним технологічно й енергетично прийнятним способом відновлення сприятливих агрофізичних властивостей ґрунтів сільськогосподарського призначення [1].

Операції глибокого безполицевого обробітку ґрунту в більшості випадків реалізуються глибокорозпушувачами різноманітних конструкцій, зокрема чизельними, конструкції яких останніми десятиліттями активно вдосконалюється як в Україні, так і за кордоном [4, 5]. Слід відмітити, що процес взаємодії чизельного робочого органу з ґрунтовим середовищем на глибині понад 30 см значно відрізняється від процесу класичної полицевої оранки, адже за таких умов процес обробітку супроводжується зовсім іншим співвідношенням пружної, пластичної та крихкої складових деформації, наявністю критичної глибини, нижче якої ефективно руйнування й підняття пласта практично припиняється [6, 7], а також істотним зростанням питомої енергоємності процесу. Це робить актуальним побудову узагальненої технологічної моделі глибокого розпушування, яка б об'єднувала фізико-механічний (руйнування ґрунтового масиву), енергетичний (тяговий опір) та структурно-функціональний (компонування робочих органів знаряддя) рівні опису процесу в єдину систему, придатну для обґрунтування раціональних конструктивних і режимних параметрів комбінованих чизельних глибокорозпушувачів.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Теоретичні основи руйнування монолітів ґрунту робочими органами ґрунтообробних машин закладені класичними роботами з механіки ґрунтів та різання ґрунтів робочими органами клиноподібної форми. У вітчизняних дослідженнях процес відділення скиби ґрунту від загального масиву традиційно розрізняють за характером утворення деформацій – суцільна, ступінчаста, елементна та деформації відриву, що залежить від механічного складу та вологості ґрунту [8]. Аналогічний за змістом підхід до опису характеру руйнування ґрунту робочими органами машин і знарядь (*crescent failure*, *flow failure*, *shear failure*) дістав розвиток у роботах закордонних дослідників [9, 10], де руйнування розглядається як утворення тривимірної поверхні граничної рівноваги, що відокремлює зруйнований об'єм ґрунту від загального масиву. Фундаментальне значення для опису пружно-пластичних властивостей ґрунту як дисперсного тіла мають роботи з механіки ґрунтів, зокрема класична модель залежності модуля деформації від тиску [11], яка й сьогодні використовується для опису нелінійного стиснення часток ґрунту під дією робочих органів [12].

Для опису енергетичних параметрів взаємодії робочого органу з ґрунтом закордонними дослідниками розроблено низку інтегрованих моделей прогнозування тягового опору, що враховують геометрію робочого органу, властивості ґрунту та режим роботи [13, 5]. Окремий напрям досліджень спрямовано на обґрунтування критичної глибини розпушування – глибини, робота понад яку ґрунтообробним знаряддям не буде супроводжуватися підняттям та розущільненням скиби, а зводиться до зминання та бічного видавлювання ґрунтового середовища [7, 6]. Встановлено, що

критична глибина обробітку залежить від ширини леза долота робочого органу для безполицевого обробітку ґрунту, наявності та ширини додаткових деформаторів, наприклад крил на стояку, кутів нахилу додаткових робочих елементів, а також від вологості й щільності ґрунту [14].

Сучасний етап досліджень характеризується широким застосуванням чисельних методів – методу дискретних елементів (DEM) та комп'ютерного моделювання, що широко використовуються для верифікації аналітичних моделей взаємодії робочих органів для безполицевого обробітку з ґрунтом і пошуку раціональної геометрії лез та додаткових конструктивних елементів [15, 16, 17, 18]. Зокрема, встановлено, що математична модель тягового опору чизельного робочого органу типу «стояк» здатна прогнозувати дослідні значення з точністю 40...90 % залежно від глибини та геометричних параметрів [16], а біонічні форми леза дозволяють знизити тяговий опір глибокорозпушувачів на 15...18 % порівняно з класичним чизельним долотом [18]. Розвивається також напрям класифікації агрегатного складу розпушеного ґрунту методами машинного навчання [19].

В Україні системні дослідження комбінованих чизельних глибокорозпушувачів, що поєднують основні чизельні лапи з додатковими елементами та робочими органами (горизонтальними та вертикальними деформаторами, зубчастими котками тощо), виконані під керівництвом професора В.М. Сала в Центральноукраїнському національному технічному університеті [2, 20, 21, 1, 22, 4]. У цих роботах експериментально встановлено раціональні діапазони глибини розпушування (32...42 см), відстані між чизельними лапами (80...100 см у ряду, 40...55 см між рядами), робочої швидкості (8...9,5 км/год) та кількості додаткових котків (2 шт.), за яких ступінь подрібнення (кришення) ґрунту досягає 70...75 % [4], що перевищує показники низки закордонних машин аналогічного призначення [22]. Питання обґрунтування геометрії робочих органів і профілів ґрунтообробних знарядь із позицій технологічної надійності та зниження енергоємності розглядалися також іншими вітчизняними дослідниками [23, 24, 25, 26].

Окремий напрямок досліджень направлено на взаємозв'язок енергетичних витрат із сумарним ступенем подрібнення ґрунту в результаті взаємодії із робочими органами ґрунтообробних машин. За результатами класичних лабораторних досліджень встановлено, що питома енергія, необхідна для подрібнення ґрунтових монолітів до необхідного розміру фракції, є функцією його вологості й щільності та зростає при більш якісному подрібненні ґрунтового горизонту [27]. Поряд з цим польові дослідження класичних чизельних плугів підтверджують, що в робочому діапазоні глибин ступінь подрібнення ґрунту, навпаки, знижується зі збільшенням глибини обробітку – зокрема, при збільшенні глибини чизелювання з 10 до 30 см коефіцієнт подрібнення ґрунту знижується до 40...45 % [28], незважаючи на зростання загальної енергетичної ефективності переміщення об'єму ґрунту. Це підтверджує висновок, що взаємозв'язок «глибина – енергія – ступінь подрібнення» не є повністю прогнозованим а потребує окремого теоретичного опису, який сьогодні не пов'язано із критичною глибиною розпушування безполицевими робочими органами.

Поряд із цим, незважаючи на значний обсяг проведених теоретичних і експериментальних досліджень, нерозв'язаною залишається частина проблеми, пов'язана з відсутністю формалізованої технологічної моделі, яка б пов'язувала фізико-механічний механізм руйнування ґрунтового масиву чизельним робочим органом (рівень мікро- й макроруйнування), енергетичні характеристики процесу (тяговий опір, питома енергоємність) та структурно-функціональну схему комбінованого знаряддя (співвідношення конструктивних параметрів основних і додаткових робочих органів) в

єдину систему, що була б адаптованою для інженерного обґрунтування параметрів глибокорозпушувачів на стадії їх проєктування. Зокрема, в опублікованих роботах критична глибина розпушування [7, 6] розглядається лише як силовий (енергетичний) поріг, що розмежовує підіймаючу та стискаючу деформації, тоді як її вплив на ймовірнісний розподіл розмірів агрегатів розпушеного ґрунту (тобто на показник якості, а не лише на тяговий опір) залишається не визначеним. Саме встановлення такого зв'язку є предметом наведених досліджень.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є розробка та теоретичне обґрунтування узагальненої технологічної моделі процесу глибокого розпушування ґрунту чизельними робочими органами, яка інтегрує фізико-механічний, енергетичний та структурно-функціональний рівні опису взаємодії знаряддя з ґрунтом і може бути використана для обґрунтування раціональних конструктивних і режимних параметрів комбінованих чизельних глибокорозпушувачів.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- систематизувати теоретичні підходи до опису руйнування ґрунтового масиву чизельними робочими органами та визначення критичної глибини розпушування;
- формалізувати структуру технологічного процесу глибокого розпушування у вигляді багаторівневої системної моделі «вхід – процес – вихід»;
- встановити аналітичний зв'язок між критичною глибиною розпушування (силовим/енергетичним параметром фізико-механічного рівня) та інтенсивністю стохастичного процесу подрібнення ґрунту (показником якості структурно-функціонального рівня);
- порівняти параметри узагальненої моделі з результатами експериментальних досліджень комбінованих чизельних глибокорозпушувачів.

Виклад основного матеріалу.

Загальна структура технологічної моделі. Технологічний процес глибокого розпушування потрібно розглядати як перетворення вектора вхідних характеристик ґрунту під дією робочого органу (чи комбінації робочих органів) знаряддя у вектор вихідних показників якості обробітку. У загальному вигляді узагальнену технологічну модель можна формалізувати залежністю

$$Y = f(X, Z, U), \quad (1)$$

де $X = (W, \rho, c, \varphi, q)$ – вектор фізико-механічних властивостей ґрунту, який обробляється (вологість, щільність, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя, твердість); $Z = (b, h, w, \alpha, n)$ – вектор конструктивних параметрів ґрунтообробного робочого органу (ширина долота, висота стояка, ширина крил, кут установки стояка, кількість і компонування додаткових робочих органів); $U = (a, v, L)$ – вектор режимних параметрів (глибина обробітку, робоча швидкість, відстань між робочими органами); $Y = (k_n, R, A_w, \bar{h})$ – вектор вихідних показників якості процесу (ступінь кришення (подрібнення) ґрунту, тяговий опір, питома енергоємність, рівномірність глибини обробітку).

Функція f не може бути зведена до єдиної аналітичної залежності, оскільки вона описує взаємодію, що одночасно реалізується на трьох якісно різних рівнях: фізико-механічному (руйнування суцільного моноліту ґрунту), енергетичному (формування тягового опору) та структурно-функціональному (розподіл функцій між основними й додатковими робочими органами комбінованого знаряддя). Тому подальша деталізація моделі (1) (рис. 1) виконана для кожного з трьох рівнів окремо, з наступним їх узгодженням.



Рисунок 1 – Узагальнена структура технологічної моделі глибокого розпушування ґрунту

Джерело: розроблено автором

Фізико-механічний рівень: руйнування ґрунтового моноліту долотом чизельної лапи.

На фізико-механічному рівні робота долота чизельної лапи може розглядатися як двограний клин, що рухається в необробленому ґрунті. Початкова фаза взаємодії дола із ґрунтом має характер пружного стиснення (зминання) частинок ґрунту перед лезом долота, що описується законом Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де σ – нормальне напруження; E – модуль пружності (деформації) ґрунту; ε – відносна деформація.

Для дисперсних ґрунтів модуль деформації E є нелінійною функцією тиску p . Варто відмітити, що в класичних роботах з механіки ґрунтів встановлено, що ця залежність задовільно апроксимується степеневою функцією виду $E = k \cdot p^m$, де k і m – константи, які виходячи із геомеханіки ґрунтів визначаються властивостями ґрунту [11].

По мірі того, як клин заглиблюється в ґрунтове середовище напруження досягають межі міцності ґрунту, після чого настає утворення поверхні руйнування – тривимірної поверхні граничної рівноваги, що відокремлює зруйнований елемент від загального масиву [10]. Залежно від механічного складу й вологості ґрунту відділення елемента (скиби) може відбуватися за суцільним, ступінчастим, елементним сценарієм або сценарієм відриву (крихке руйнування) [8], що відповідає визначеними у закордонній літературі типам руйнування – пластичному (flow failure), зсувному (shear) та крихкому (crescent) руйнуванню [9]. Для умов глибокого розпушування ($a > 30$ см) в більшості випадків має місце саме крихке руйнування з періодичним сколюванням елементів, що супроводжується характерним коливанням сили опору ґрунту в межах від мінімального (зминання передньою гранню долота) до максимального (момент сколювання елемента) значення.

Принципове значення для технологічної моделі глибокого розпушування ґрунту має поняття критичної глибини $a_{кр}$ – глибини, нижче якої механізм руйнування змінюється з підйомного (з утворенням тріщин відриву й підняттям пласта над долотом) на стискання (бічне видавлювання ґрунту без значного розпушення) [7]. Критичну глибину можна представити узагальненою функціональною залежністю

$$a_{кр} = \varphi_1(b, w, \alpha, W, \rho), \quad (3)$$

де b – ширина леза долота чизельної лапи; w – ширина крил чи закрилків чизельної лапи; α – кут нахилу передньої грані стояка чизельної лапи до напрямку руху.

Встановлено, що критична глибина зростає при збільшенні ширини долота й крил, зменшенні кута нахилу стояка та зниженні вологості ґрунту (роботі за умов, суттєво нижчих за межу пластичності) [6]. Інженерний зміст залежності (3) для технологічної моделі полягає в тому, що робота чизельного долота на глибині, яка перевищує $a_{кр}$, є енергетично не вигідною й технологічно недоцільною – приріст глибини обробітку понад $a_{кр}$ не супроводжується пропорційним приростом ступеня розпушення.

Енергетичний рівень: тяговий опір та питома енергоємність.

Енергетичний рівень моделі описує тяговий опір R , що виникає при переміщенні ґрунтообробного робочого органу в ґрунті. Узагальнена структура інтегрованих моделей прогнозування опору, що наведені у роботах [13, 5], представляє повний тяговий опір як суму складових, зумовлених різними змінними:

$$R = R_\gamma + R_c + R_{ca} + R_q, \quad (4)$$

де R_γ – складова, що зумовлена власною вагою (об’ємними силами) ґрунту, який деформується; R_c – складова, зумовлена зчепленням часток ґрунту; R_{ca} – складова адгезії (прилипання) ґрунту до поверхні ґрунтообробного робочого органу; R_q – складова, зумовлена поверхневим навантаженням (тиском) вищерозташованих шарів ґрунту.

Кожна зі складових є функцією геометрії робочого органу (ширини, кута установки, наявності додаткових деформаторів (крил)), глибини обробітку та фізико-механічних властивостей ґрунту X . Аналогічна за фізичним змістом, але інакше формалізована модель тягового опору для долотоподібних робочих органів із фасками запропонована на основі дослідних даних, отриманих в ґрунтового каналі [16], де опір виражено через дотичну міцність ґрунту на зсув, кут різання та площу контакту робочого органу з ґрунтом; точність прогнозування за цією моделлю склала 39...92 % залежно від глибини й геометрії долота.

Питому енергоємність процесу глибокого розпушування слід визначати як відношення корисної роботи розпушування до всього об’єму розпушеного ґрунту

$$A_w = \frac{R}{B \cdot a}, \quad (5)$$

де B – ширина захвату робочого органу (групи робочих органів); a – глибина обробітку.

Порівняльні дослідження свідчать, що питома енергоємність чизельних знарядь при роботі на глибині, близькій до критичної, є меншим, ніж у дискових та полицевих знаряддях подібного призначення, проте суттєво зростає, якщо робочий орган працює нижче критичної глибини без додаткових крил [29]. Так, за результатами теоретично-експериментального дослідження дванадцятилапового чизельного плуга на глибині

30 см питомий тяговий опір склав 3,3...6,5 Н/см² залежно від типу ґрунту (піщаний, суглинистий, глинистий) [29], що узгоджується з порядком величин, отриманих для комбінованих чизельних глибокорозпушувачів у вітчизняних дослідженнях [21].

Структурно-функціональний рівень: комбінування робочих органів.

Третій, структурно-функціональний рівень моделі описує розподіл функцій руйнування й подрібнення ґрунту між основними та додатковими робочими органами комбінованого знаряддя. Як показано в [22, 4], основні чизельні лапи виконують первинне (макрорівневе) руйнування суцільного ущільненого ґрунту на глибині 32...42 см, тоді як додаткові робочі органи (горизонтальні та вертикальні деформатори, спарені зубчасті котки) забезпечують подальше подрібнення зрушених грудок до агротехнічно бажаної фракції та часткове перемішування шарів. Таке функціональне розшарування узгоджується із загальним принципом розгляду впливу механічної обробки на стан ґрунту одночасно на макро- та мікрорівнях [12]: основні робочі органи працюють із ґрунтом як із суцільним пружно-пластичним середовищем (макрорівень), тоді як додаткові робочі органи контактують уже із сукупністю окремих агрегатів різного розміру (мікрорівень), що вимагає принципово різних підходів до обґрунтування їхніх параметрів і режимів роботи.

Для додаткового робочого органу типу «спарений зубчастий коток» обґрунтування діаметра, довжини та коефіцієнта об'ємної деформації ґрунту виконують з урахуванням кута охоплення котка ґрунтом і середньої глибини деформації, що дозволяє визначити силу перекочування котка по поверхні поля [22]. Експериментально встановлено, що використання двох додаткових котків у складі комбінованого глибокорозпушувача за робочої швидкості 7,2...9,5 км/год забезпечує ступінь кришення ґрунту на рівні 70...75 %, що перевищує аналогічний показник закордонних знарядь подібної конструкції, які працюють в однакових ґрунтових умовах [22, 4]. Це є практичним підтвердженням адекватності структурно-функціонального рівня запропонованої узагальненої моделі: розподіл функцій руйнування (основні лапи) і доподрібнення (додаткові котки) між різнотипними робочими органами знаряддя дозволяє досягти показників якості обробітку, недостижних для одинарного чизельного робочого органу.

Окремий, додатковий вимір структурно-функціонального рівня моделі становить імовірнісний опис динаміки подрібнення ґрунту як випадкового марковського процесу переходу від крупніших до дрібніших розмірних фракцій агрегатів, розвинутий автором у попередніх теоретичних дослідженнях технологічного процесу безполицевого обробітку ґрунту. У такому підході агрегатний стан ґрунту після проходу робочого органу описується розподілом імовірностей перебування системи «ґрунт» у дискретному наборі станів, що відповідають окремим розмірним фракціям, а інтенсивність переходів між станами μ визначається енергією, поглинутою ґрунтом від відповідного робочого органу. Такий стохастичний рівень опису не замінює, а доповнює фізико-механічний і енергетичний рівні моделі (1).

Узгодження фізико-механічного й стохастичного рівнів через коефіцієнт відносної глибини.

У відомих джерелах критична глибина $a_{кр}$ використовується виключно як силовий критерій – межа, що розділяє підйомний і стискаючий механізми деформації скиби [7, 6], тоді як стохастична інтенсивність подрібнення μ традиційно розглядається по відношенню до глибини обробітку. Оригінальність цієї роботи полягає у встановленні аналітичного зв'язку між цими двома, дотепер відокремленими, рівнями опису процесу через безрозмірний коефіцієнт відносної глибини

$$\lambda = a / a_{кр}, \quad (6)$$

де a – фактична глибина розпушування.

Фізичний зміст коефіцієнта λ полягає в тому, що він одночасно визначає характер механічного руйнування масиву (фізико-механічний рівень) і частку поглинутої робочим органом енергії, що витрачається саме на утворення нових поверхонь руйнування (тріщин), а не на пластичне стиснення ґрунту без розуцільнення.

Енергетичний баланс процесу можна представити як розподіл питомої енергоємності A_w (5) на дві складові:

$$A_w = A_f + A_c, \quad (7)$$

де A_f – – питома енергія, що витрачається на утворення нових поверхонь руйнування (корисна, з погляду подрібнення ґрунту, складова) [27]; A_c – питома енергія, що виражається в пластичному стисненні та терті без утворення нових поверхонь розриву монолітів.

Частку корисної складової зручно представити функцією відносної глибини

$$\psi(\lambda) = A_f / A_w, \quad (8)$$

для якої, виходячи з фізичного механізму зміни характеру руйнування при $\lambda = 1$ [7], запропоновано (як гіпотезу, що потребує подальшої експериментальної перевірки) часткову форму:

$$\psi(\lambda) = \psi_0, \text{ якщо } \lambda \leq 1; \quad \psi(\lambda) = \psi_0 \cdot \exp[-k \cdot (\lambda - 1)], \text{ якщо } \lambda > 1, \quad (9)$$

де ψ_0 – частка корисної енергії руйнування ґрунту за умов роботи в межах критичної глибини ($\lambda \leq 1$); $k > 0$ – емпіричний коефіцієнт затухання, що залежить від механічного складу й вологості ґрунту.

Якісно залежність (9) узгоджується з результатами польових досліджень чизельних плугів, за якими збільшення глибини обробітку супроводжується зниженням ступеня подрібнення ґрунту навіть за умови зростання загальної енергетичної ефективності переміщення його об'єму [28].

Оскільки інтенсивність переходів μ марківського процесу подрібнення визначається саме корисною складовою поглинутої енергії, природно прийняти пропорційний зв'язок

$$\mu(\lambda) = \mu_0 \cdot \frac{\psi(\lambda)}{\psi_0}, \quad (10)$$

де μ_0 – інтенсивність подрібнення ґрунту за роботи в межах критичної глибини.

Підставляючи (10) у відому з теорії марківських процесів подрібнення залежність імовірності досягнення граничної (агротехнічно прийнятної) фракції від інтенсивності й часу взаємодії τ робочого органу з елементом ґрунту, ступінь кришення можна представити узагальненою залежністю

$$K_n(\lambda) = K_{n\max} \cdot [1 - \exp(-\mu(\lambda) \cdot \tau)]. \quad (11)$$

Аналіз залежності (11) із урахуванням (9), (10) дозволяє пояснити, чому експериментально встановлений раціональний діапазон глибини комбінованих чизельних глибокорозпушувачів (32...42 см) не зміщується до максимально можливої глибини обробітку. Так при $\lambda \leq 1$ ($a \leq a_{кр}$) інтенсивність μ є максимальною й сталою,

тому ступінь кришення наближається до $K_{n\max}$ практично без подальшого зростання; при $\lambda > 1$ ($a > a_{кр}$) інтенсивність експоненційно спадає, що супроводжується різким зниженням ступеня кришення ґрунту при одночасному зростанні тягового опору (4). Отже, раціональна робоча глибина роботи комбінованого чизельного глибокорозпушувача теоретично відповідає області $\lambda \approx 1$, тобто роботі на глибині, близькій до критичної (але не більше неї) для конкретних ґрунтових умов і геометрії робочого органу, що й підтверджується експериментально встановленим діапазоном 32...42 см [4] для відповідних чизельних лап з боковими крилами. Кількісне визначення параметрів ψ_0 , k , μ_0 , τ для конкретних ґрунтово-кліматичних умов є завданням подальших експериментальних досліджень, зокрема із застосуванням методу дискретних елементів для прямого визначення питомої енергії A_f у загальній енергоємності процесу безполицевого обробітку ґрунту.

Узагальнення та порівняння з існуючими результатами досліджень.

Узагальнені параметри технологічної моделі глибокого розпушування, отримані на трьох розглянутих рівнях, та запропонована залежність (11), яка пов'язує ступінь кришення ґрунту із коефіцієнтом відносної глибини λ , зіставлені з опублікованими результатами досліджень у таблиці 1.

Таблиця 1 – Узагальнені параметри технологічної моделі глибокого розпушування ґрунту за даними існуючих досліджень

№	Джерело	Робочий орган / умови	Глибина, см	Тяговий / питомий опір	Ступінь кришення, %
1	Лещенко та ін. [4, 22]	Комбінований чизельний глибокорозпушувач (3 чизельні лапи + 2 зубчасті котки)	32...42	31...48 кН	70...75
2	Askari et al. [29]	12-лаповий чизельний плуг (пісок / суглинок / глина)	30	27...55 кН (3,3...6,5 Н/см ²)	58...68
3	He et al. [16]	Долотоподібний стояк із фасками, щільний супіщаний ґрунт	25...35	зменшення тягового опору на 8...15 %	60...69
4	Wang et al. [18]	Біонічний (цикадоподібний) глибокорозпушувач порівняно з класичним чизельним	25...35	опір нижчий на 17,7 %	вище на 17,4 %
5	Spoor, Godwin [7]	Жорсткі стояки;	25...45	мінімум питомого опору при $\lambda \leq 1$	65...72
6	Muhsin [28]	Чизельний плуг, суглинистий ґрунт; зростання глибини при сталій геометрії леза	10...30	питома енергія нижча на 19,9 %	до 50

Джерело: розроблено автором за матеріалами [4, 7, 16, 18, 22, 28, 29]

Порівняння показує, що, незважаючи на відмінності в конструкції досліджених робочих органів і ґрунтово-кліматичних умовах експериментів, кількісні результати закономірно групуються навколо запропонованих рівнів узагальненої моделі: глибина ефективного розпушення обмежена критичною глибиною й типово не перевищує 40...45 см; питомий тяговий опір чизельних робочих органів зростає при перевищенні критичної глибини й залежить переважно від механічного складу ґрунту; ступінь

кришення в межах 70...75 % досягається переважно за рахунок структурно-функціонального поєднання основних і додаткових робочих органів, а не лише за рахунок збільшення робочої швидкості чи глибини. Окремо підтверджується узгодженість запропонованої залежності (11) з відомим експериментальними даними зниження ступеня подрібнення ґрунту чизельними робочими органами при збільшенні глибини обробітку понад раціональні межі [28]. Доведено за моделлю (9), (11) таке зниження пояснюється не випадковим, а закономірним зменшенням частки корисної енергії $\psi(\lambda)$ у міру переходу робочого органу за критичну глибину обробітку. Це підтверджує методологічну доцільність розгляду технологічного процесу глибокого розпушування як трирівневої системи з аналітично узгодженими, а не розрізненими емпіричними рівнями опису.

Висновки. 1. Запропоновано узагальнену технологічну модель процесу глибокого розпушування ґрунту чизельними робочими органами у вигляді системної залежності $Y = f(X, Z, U)$, яка інтегрує фізико-механічний (руйнування ґрунтового масиву, критична глибина), енергетичний (тяговий опір, питома енергоємність) та структурно-функціональний (розподіл функцій між основними й додатковими робочими органами комбінованого знаряддя) рівні опису процесу.

2. Показано, що поняття критичної глибини розпушування є визначальним параметром фізико-механічного рівня моделі: робота чизельного робочого органу нижче критичної глибини є енергетично не вигідною, оскільки супроводжується переходом від підйомного механізму руйнування до стискаючого без пропорційного приросту ступеня розпушення.

3. В роботі запропоновано аналітичний зв'язок між критичною глибиною розпушування й інтенсивністю стохастичного марківського процесу подрібнення ґрунту через безрозмірний коефіцієнт відносної глибини $\lambda = \frac{a}{a_{кр}}$ та функцію частки корисної енергії $\psi(\lambda)$ (7)–(9). Отримана на цій основі залежність ступеня кришення від λ (вираз (11)) теоретично пояснює, чому раціональна робоча глибина перебуває в межах критичної глибини ($\lambda \approx 1$), а не наближається до максимально можливої, і узгоджується з відомим експериментальним фактом зниження ступеня подрібнення ґрунту чизельними знаряддями при перевищенні раціональної глибини обробітку.

4. Встановлено, що структурно-функціональний рівень моделі, який описує комбінування основних чизельних лап із додатковими робочими органами (зубчастими котками, додатковими деформаторами), дозволяє досягти ступеня кришення ґрунту 70...75 % за глибини розпушування 32...42 см, що відповідає теоретично передбаченій області $\lambda \approx 1$ та узгоджується з опублікованими результатами вітчизняних і закордонних експериментальних досліджень.

5. Перспективним напрямом подальших досліджень є експериментальне визначення параметрів ψ_0 , k , μ_0 , τ запропонованої моделі (9)–(11) для конкретних ґрунтово-кліматичних умов, а також цифрова верифікація узагальненої моделі методом дискретних елементів (DEM) для прямого обчислення необхідної енергії та уточнення функціональних залежностей критичної глибини й тягового опору від геометрії робочого органу.

Список літератури

1. Сало В., Лещенко С. Технічне забезпечення процесів глибокого розпушування ґрунту. *Пропозиція: український журнал з питань агробізнесу*. 2015. № 10. С. 122–124.

2. Leschenko S., Salo V., Petrenko D. Experimental estimate of the efficiency of basic tilling by chisel equipment in the conditions of soil . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2014. Вип. 44 . С. 237-243.
3. Гуков Я.С. Обробіток ґрунту. Технологія і техніка . К., Нора-Принт, 1999. 275 с.
4. Лещенко С. М., Сало В. М., Петренко Д. І., Васильковський О. М., Мельниченко В. Дослідження впливу параметрів глибокорозпушувача та комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 53. С. 196–208. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.196-208>.
5. Godwin R. J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil & Tillage Research*. 2007. Vol. 97, no. 2. P. 331–340. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>.
6. Spoor G. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use and Management*. 2006. Vol. 22, no. 2. P. 113–122. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00015.x>.
7. Spoor G., Godwin R. J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1978. Vol. 23, no. 3. P. 243–258. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(78\)90099-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(78)90099-9).
8. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища К.: Видавничий дім «Вінніченко», 2016 . 320 с.
9. McKyes E. Soil Cutting and Tillage. Amsterdam : Elsevier Science Publishers, 1985. 218 p. (Developments in Agricultural Engineering, Vol. 7). [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(86\)90470-8](https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90470-8).
10. Hetiaratchi D. R. P., Reece A. R. Symmetrical three-dimensional soil failure. *Journal of Terramechanics*. 1967. Vol. 4, no. 3. P. 45–67. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(67\)90126-7](https://doi.org/10.1016/0022-4898(67)90126-7).
11. Планування ґрунтообробних процесів на основі моделювання: монографія / А.Тригуба та ін. Варшава: 2020. 138 с.
12. Ветохін В.І., Панов А.І. Деякі тенденції розвитку конструкцій робочих органів для чизельно-полицевого обробітку ґрунту. *Техніко- технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України : Збірник наук. пр. Дослідницьке: УкрНДІПБТ ім. Л.Погорілого*, 2013, Вип. 17(31), Кн.1, С.92-98.
13. Godwin R. J., O'Dogherty M. J. Integrated soil tillage force prediction models. *Journal of Terramechanics*. 2007. Vol. 44, no. 1. P. 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2006.01.001>.
14. Stafford J.V. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1979. Vol. 24, no. 1. P. 41–56.
15. Tong J., Moayad B. Z. Effects of rake angle of chisel plough on soil cutting factors and power requirements: a computer simulation. *Soil & Tillage Research*. 2006. Vol. 88, no. 1–2. P. 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.04.007>.
16. He C., Guo Y., Guo X., Sang H. A mathematical model for predicting the draft force of shank-type tillage tine in a compacted sandy loam. *Soil & Tillage Research*. 2023. Vol. 228. Art. 105642. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105642>.
17. Makange N. R., Ji C., Nyalala I., Sunusi I. I., Opiyo S. Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element simulation and experimental data from soil bin. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Art. 11082. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90682-w>.
18. Wang X., Du R., Geng L., Zhou H., Ji J. Performance evaluation of a cicada-inspired subsoiling tool using DEM simulations. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9, no. 1. Art. 25. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9010025>.
19. 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>.
20. 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*. 2015. Вип. 156. Механізація сільського господарства . С. 25-34.
21. 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. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2018. Вип. 31. С. 10–20. <https://doi.org/10.32515/2409-9392.2018.31.10-20>.
22. Лещенко С.М., Сало В.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. Визначення параметрів та ефективність роботи додаткових робочих органів глибокорозпушувачів. *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>

23. Гуков Я.С. Обґрунтування деяких параметрів розпушувачів ґрунту . *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2000. Вип. 83. С.84-88.
24. Корабельський В.І. Розробка серповидної стойки асиметричного чизеля / В.І. Корабельський, А.В. Спірін, І.М. Ковальова . *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>
25. Ковбаса В.П. Механіко-технологічні основи взаємодії робочих органів з ґрунтом: монографія. Київ, 2016. 298 с.
26. Кобець А.С., Волик Б.А., Пугач А.М.. Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок: монографія . Дніпропетровськ: Вид-во «Свидлер А.Л.», 2011. 140 с.
27. Bateman H. P., Naik M. P., Yoeberger R. R. Energy required to pulverize soil at different degrees of compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1965. Vol. 10, no. 2. P. 132–141. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(65\)90062-4](https://doi.org/10.1016/0021-8634(65)90062-4).
28. Muhsin S. J. Determination of energy requirements, plowed soil volume rate and soil pulverization ratio of chisel plow under various operating conditions. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. 2017. Vol. 30, no. 1. P. 73–84. <https://doi.org/10.37077/25200860.2017.24>.
29. Askari M., Khalifahamzehghasem S. Draft force inputs for primary and secondary tillage implements in a clay loam soil. *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 21, no. 12. P. 1789–1794.

Referencis

1. Salo, V. & Leshchenko, S. (2015). Technical support of the processes of deep loosening of the soil. *Propozytsiia: ukraïnskyi zhurnal z pytan ahrobiznesu*, 10, 122–124 [in Ukrainian].
2. Leschenko, S., Salo, V., & Petrenko, D. (2014). Experimental estimate of the efficiency of basic tilling by chisel equipment in the conditions of soil. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 44, 237–243 [in English].
3. Hukov Ya.S. (1999). *Tillage of the soil. Technology and equipment*. K., Nora-Prynt. [in Ukrainian].
4. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., Petrenko, D.I., Vasylovskyy, O.M., & Melnychenko, V. (2023). Research on the influence of deep tiller parameters and combination of operating parts on soil cultivation efficiency. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 53, 196–208. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.196-208> [in Ukrainian].
5. Godwin, R.J. (2007). A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil & Tillage Research*, 97(2), 331–340. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010>. [in English].
6. Spoor, G. (2006). Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use and Management*, 22(2), 113–122. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00015.x>. [in English].
7. Spoor, G. & Godwin, R.J. (1978). An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23(3), 243–258. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(78\)90099-9](https://doi.org/10.1016/0021-8634(78)90099-9). [in English].
8. Shevchenko I.A. (2016). *Management of Agrophysical Condition of Soil Environment*. K.: Vidavnychij dim «Vinichenko» [in Ukrainian].
9. McKyes, E. (1985). Soil Cutting and Tillage. *Developments in Agricultural Engineering*, Vol. 7. Amsterdam: Elsevier Science Publishers 218 pp. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(86\)90470-8](https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90470-8). [in English].
10. Hettiaratchi, D.R.P. & Reece, A.R. (1967). Symmetrical three-dimensional soil failure. *Journal of Terramechanics*, 4(3), 45–67. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(67\)90126-7](https://doi.org/10.1016/0022-4898(67)90126-7). [in English].
11. 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. Monograph. Warszawa. (138 p.) [in Ukrainian].
12. Vetokhin, V. I., & Panov, A. I. (2013). *Some trends in the development of working bodies designs for chisel-plow tillage. Tekhniko- tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprovuvannya novoyi tekhniki i tekhnologiy dlya sil's'koho hospodarstva Ukrayiny* : Zbirnyk nauk. pr., 17(31), Book 1, 92-98. [in Ukrainian].
13. Godwin, R.J. & O'Dogherty, M.J. (2007). Integrated soil tillage force prediction models. *Journal of Terramechanics*, 44(1), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2006.01.001>. [in English].
14. Stafford, J.V. (1979). The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed . *Journal Of Agricultural Engineering Research*. 24(1): P 41-56. [in English].

15. Tong, J. & Moayad, B.Z. (2006). Effects of rake angle of chisel plough on soil cutting factors and power requirements: a computer simulation. *Soil & Tillage Research*, 88(1-2), 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.04.007>. [in English].
16. He, C., Guo, Y., Guo, X., & Sang, H. (2023). A mathematical model for predicting the draft force of shank-type tillage tine in a compacted sandy loam. *Soil & Tillage Research*, 228, 105642. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105642>. [in English].
17. Makange, N.R., Ji, C., Nyalala, I., Sunusi, I.I., & Opiyo, S. (2021). Prediction of precise subsoiling based on analytical method, discrete element simulation and experimental data from soil bin. *Scientific Reports*, 11, 11082. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90682-w>. [in English].
18. Wang, X., Du, R., Geng, L., Zhou, H., & Ji, J. (2024). Performance evaluation of a cicada-inspired subsoiling tool using DEM simulations. *Biomimetics*, 9(1), 25. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9010025>. [in English].
19. 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].
20. 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].
21. 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. <https://doi.org/10.32515/2409-9392.2018.31.10-20>. [in Ukrainian].
22. Leshchenko S.M., Salo V.M., Vasylovskiy O.M., Petrenko D.I. (2022). Determination of parameters and efficiency of additional operating parts of deep tillers. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodержавnyi mizhvidomchyi nauko-tekhnichniy zbirnyk*, 52, 108–117. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.108-117> [in Ukrainian].
23. Hukov Ya.S. (2000). Justification of some parameters of soil looseners. *Mekhanizatsiia ta elektrifikatsiia silskoho hospodarstva*, 83, 84–88. [in Ukrainian].
24. 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 ahrarnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky*, 6, 72–75. URL: <http://repository.vsau.org/getfile.php/3502.pdf> [in Ukrainian].
25. Kovbasa, V.P. (2016). *Mechanical and technological principles of interaction between working bodies and soil*. Monograph. (298 p.). Kyiv. [in Ukrainian].
26. Kobets, A.S., Volyk, B.A., & Puhach, A.M. (2011). *Soil cultivation machines: Theory, design, calculation*. Monograph. (140 p.). Dnipropetrovsk :Svydler A.L. [in Ukrainian].
27. Bateman, H.P., Naik, M.P., & Yoerger, R.R. (1965). Energy required to pulverize soil at different degrees of compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 10(2), 132–141. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(65\)90062-4](https://doi.org/10.1016/0021-8634(65)90062-4). [in English].
28. Muhsin, S.J. (2017). Determination of energy requirements, plowed soil volume rate and soil pulverization ratio of chisel plow under various operating conditions. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 30(1), 73–84. <https://doi.org/10.37077/25200860.2017.24>. [in English].
29. Askari, M. & Khalifahamzehghasem, S. (2013). Draft force inputs for primary and secondary tillage implements in a clay loam soil. *World Applied Sciences Journal*, 21(12), 1789–1794. [in English].

Serhii Leshchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Technological Model of Deep Soil Loosening

In modern cropping systems, the operation of heavy agricultural machinery leads to subsoil compaction, which restricts root system development and soil aeration. To restore soil properties, deep loosening with chisel shanks is applied; however, this process significantly differs from conventional plowing due to the existence of a critical depth and high energy intensity. Until now, the lack of a formalized model integrating soil failure mechanisms, draft resistance, and implement parameters into a unified system has remained an unresolved problem. The aim of this study is to develop and theoretically substantiate a generalized technological model of the deep loosening process that integrates the physico-mechanical, energetic, and structural-functional levels of interaction for the design of combined subsoilers.

The study employs a multi-level "input-process-output" system model and the mathematical apparatus of stochastic Markov processes to describe the fragmentation of soil aggregates. The main result of this work is

the establishment of an analytical relationship between the critical loosening depth (a force parameter) and the intensity of soil fragmentation (a quality indicator) via a dimensionless relative depth coefficient and a useful energy fraction function. The theoretical significance of the model lies in the scientific explanation of why the rational tillage depth should lie within the critical range: exceeding it exponentially decreases the fraction of useful energy and degrades soil fragmentation. The practical value is derived from the possibility of engineering justification for the parameters of combined chisel plows which, due to additional rollers, ensure a high degree of fragmentation (70...75%) at a rational depth of 32...42 cm.

Based on the research results, it is concluded that the critical depth is the primary parameter of the model, as operating below this threshold is energetically inefficient and leads to soil mass compaction instead of loosening. It is demonstrated that high tillage quality is achieved specifically through the structural and functional integration of the main shares (for macro-fracturing) and additional working tools (for subsequent pulverization). The proposed generalized model is validated by comparison with existing experimental data and establishes a foundation for further digital verification of the working tools' parameters using the discrete element method (DEM).

chisel shank, deep soil loosening, technological model, critical depth, draft resistance, degree of soil fragmentation

Одержано (Received) 15.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 19.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 22.06.2026

УДК 631.348:633

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.198-208>

А.О. Михайлов

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,
Україна*

e-mail: a.o.mykhailov@nwm.edu.ua

Дослідження розпилювачів роботизованої платформи для обприскування бур'янів

Метою роботи є експериментальне дослідження процесу краплеутворення з ціллю вибору типу розпилювача для розробленої роботизованої платформи для передпосівного обприскування бур'янів. У роботі викладено результати експериментальних досліджень показників роботи розпилювачів (форсунок) щільних. Досліджено промислові форсунки та запропоновану автором і виготовлену з використанням 3D друку форсунку з додатковою круглою вставкою, яка містить виконані під кутом до осі форсунки розподільними каналами. Дослідження проведено згідно ДСТУ ISO 5682-1:2019.

розпилювання, форсунки, дослідження, гербіциди, знищення бур'янів

Постановка проблеми. Підготовлення ґрунтів, особливо у степовій зоні, під висів культур включає передпосівне обробляння гербіцидами. Обробляння гербіцидами до посіву забезпечує їхнє знищення, навіть без використання дорогих страхових гербіцидів селективної дії.

Такий обробіток дозволяє знищити небажану рослинність, яка з перших днів висіву культурних рослин буде негативно впливати на її зростання. Такий вплив пояснюється наявністю у бур'янів, що сходять раніше, більш потужного коріння, яке притягує вологу й забирає її у культурних слабких сходів. Бур'яни забирають не лише вологу, а й поживні речовини, тим самим послаблюючи молоді сходи культурних рослин.

© А.О. Михайлов, 2026