

МЕХАНІЗМ ВЗАЄМОДІЇ ВІБРАЦІЇ З ҐРУНТОМ У ПРОЦЕСАХ ВІБРАЦІЙНОГО ОБРОБІТКУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У тезах розглянуто механізм взаємодії вібрації з ґрунтом у процесі вібраційного обробітку та оранки. Показано, що накладення коливань на робочий орган змінює характер силової взаємодії в зоні контакту, переводячи процес руйнування ґрунту з статичного в динамічний режим із періодичним розвантаженням. Наведено основні силові та кінематичні залежності, зокрема вплив амплітуди, частоти коливань, швидкості поступального руху та кута атаки робочого органа на тяговий опір і енерговитрати. Обґрунтовано, що ефект вібрації полягає у зниженні міцності ґрунту на зсув, ослабленні контактної тертя та інтенсифікації утворення мікротріщин і зон локального руйнування. Встановлено, що ефективність процесу істотно залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту та підбору режимів вібрації.

Ключові слова: вібраційний обробіток ґрунту, вібраційна оранка, механізм взаємодії, ґрунт, робочий орган, тяговий опір, амплітуда коливань, частота коливань, кут атаки, силова взаємодія, динамічний режим, зсув ґрунту, мікротріщини.

Abstract

The theses examine the mechanism of interaction between vibration and soil in the process of vibratory tillage and plowing. It is shown that applying oscillations to the working body changes the nature of force interaction in the contact zone, transforming the soil failure process from a static regime into a dynamic one with periodic unloading. The main force and kinematic relationships are presented, including the influence of vibration amplitude, vibration frequency, translational speed, and the working body attack angle on draft resistance and energy consumption. It is substantiated that the vibration effect lies in reducing the soil's shear strength, weakening contact friction, and intensifying the formation of microcracks and local failure zones. It is established that the efficiency of the process depends significantly on the physicomachanical properties of the soil and the selection of vibration parameters.

Keywords: vibratory tillage, vibratory plowing, interaction mechanism, soil, working body, draft resistance, vibration amplitude, vibration frequency, attack angle, force interaction, dynamic regime, soil shear, microcracks.

Вібраційний обробіток ґрунту є перспективним напрямом удосконалення плужних і розпушувальних машин, оскільки вібрація змінює сам характер взаємодії робочого органа з ґрунтом. На відміну від традиційної оранки, де опір визначається переважно статичним різанням, тертям і підняттям ґрунтової маси, у вібраційному режимі навантаження стає змінним у часі, а процес руйнування – дискретним та імпульсним. Це дає змогу знижувати тяговий опір, покращувати кришення ґрунту і зменшувати енерговитрати на обробіток[1,2].

Фізична сутність ефекту полягає в тому, що коливання робочого органа спричиняють періодичну зміну контактної тиску, тертя та локальних напружень у зоні взаємодії «метал–ґрунт». У результаті руйнування ґрунту переходить із безперервного статичного режиму в режим циклічного розвантаження, коли частина енергії витрачається не на суцільне продавлювання шару, а на ініціювання мікротріщин і локальних зсувів. Саме тому вібрація не просто «допомагає» плугу, а змінює механізм утворення зони руйнування[3].

Найважливішими параметрами процесу є частота, амплітуда, швидкість поступального руху, кут атаки робочого органа, а також фізико-механічні властивості ґрунту – вологість, щільність, когезія та кут внутрішнього тертя. Для ефективного зниження тягового опору частота й амплітуда мають бути узгоджені з динамікою руйнування ґрунту. Гармонічний рух можна подати як[4,5]:

$$y(t) = A \sin(\omega t),$$

$$\dot{y}(t) = A\omega \sin(\omega t),$$

$$\ddot{y}(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t).$$

де A – амплітуда, $\omega = 2\pi f$ – кругова частота, f – частота коливань. Повна відносна швидкість робочого органа щодо ґрунту визначається як:

$$v_{rel} = V + \dot{y}t,$$

де V – швидкість поступального руху агрегату[3].

Силова схема вібраційного обробітку включає тягове зусилля P , нормальну реакцію ґрунту N , силу тертя $T = \mu N$, опір зсуву R_s та інерційну складову ma . У найзагальнішому вигляді горизонтальна тяга може бути подана як[6]:

$$F_x = F_{cut} + F_{fr} + F_{acc},$$

де F_{cut} – сила руйнування або зрізу, F_{fr} – сила тертя, F_{acc} – інерційна складова. У вібраційному режимі ця сила набуває часової залежності[1,6]:

$$F_x(t) = F_0 + \Delta F(t),$$

де F_0 – середній опір без вібрації, а $\Delta F(t)$ – змінна частина, що виникає через коливання [1,6].

Механізм зниження опору пояснюється двома головними ефектами. Перший – зменшення середньої міцності ґрунту на зсув через циклічне навантаження, мікроруйнування структурних зв'язків і зниження ефективного тертя між частинками. Другий – динамічне розвантаження контакту, коли інструмент на частину циклу рухається так, що контактний тиск падає, а іноді й частково переривається. Практично це означає, що ґрунт руйнується серією локальних імпульсів, а не одним безперервним фронтом зсуву[2,3].

Особливо важливою є роль частоти коливань. Класичні дослідження показують, що різке зниження опору виникає тоді, коли частота вібрації наближається до характерної частоти формування зсувної зони в ґрунті або узгоджується з ритмом його руйнування. Інакше кажучи, ефективність залежить не від просто високої частоти, а від правильного фазово-частотного режиму. Саме тому надмірне збільшення частоти чи амплітуди не завжди покращує процес і може, навпаки, збільшувати навантаження на раму та привід[4].

Тип ґрунту істотно впливає на результат. Для зв'язних глинистих ґрунтів вібрація часто дає сильніший ефект, бо краще руйнує когезійні зв'язки. Для піщаних і слабкозв'язаних ґрунтів ефект пов'язаний переважно зі зменшенням тертя та полегшенням переміщення частинок. Отже, вібраційна оранка не є універсальним рішенням, а потребує підбору режимів під конкретні ґрунтові умови[3,4].

Енергетична оцінка процесу повинна враховувати не лише зменшення тягового опору, а й витрати на створення самої вібрації. Загальна енергія може бути подана як:

$$E_{tot} = E_{draft} + E_{vib},$$

де E_{draft} – енергія тяги, а E_{vib} – енергія на вібратор. Енергетично доцільною вібрація є лише тоді, коли зменшення тягових витрат перевищує додаткові витрати на коливальний привід. Саме тому в сучасних роботах акцент зміщується від самого факту застосування вібрації до оптимізації параметрів її дії[8,9].

Отже, механіка вібраційної оранки ґрунту базується на періодичній зміні сил і напружень у зоні контакту, циклічному послабленні ґрунтової структури та динамічному зниженні опору руху. Найефективніший режим досягається тоді, коли частота й амплітуда коливань, геометрія робочого органа та швидкість агрегату узгоджені між собою і з механічними властивостями ґрунту. У практичному сенсі це дозволяє підвищити якість кришення, знизити тяговий опір і зробити ґрунтообробку більш енергоощадною[1,2,7,9].

Відтак, вібраційний обробіток ґрунту є ефективним напрямом удосконалення ґрунтообробних машин, оскільки накладення коливань на робочий орган змінює механіку взаємодії з ґрунтом, переводячи процес руйнування зі статичного в динамічний режим із періодичним розвантаженням. Це дає змогу знижувати тяговий опір, зменшувати енерговитрати, покращувати кришення та розпушення ґрунту, а також інтенсифікувати утворення мікротріщин і локальних зон руйнування. Водночас ефективність процесу істотно залежить від амплітуди, частоти коливань, швидкості руху агрегату, кута атаки та фізико-механічних властивостей ґрунту, тому подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію цих параметрів для конкретних ґрунтових умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Razzaghi E., Sohrabi Y. Vibratory soil cutting a new approach for the mathematical analysis. Soil and tillage research. 2016. Volume 159. P. 33–40. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198716300095>.
2. Поліщук О., Загнітко Я. Вібраційний обробіток ґрунту: аналіз технологій та перспективи застосування. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2025. Т. 351, № 3.1. С. 438–443. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-54>.
3. Tanaka H., Oida A., Daikoku M., Inooku K., Sumikawa O., Nagasaki Y., Miyazaki M. DEM Simulation of Soil Loosening Process Caused by a Vibrating Subsoiler // Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. – 2007. – Vol. IX. – Manuscript PM 05 010.
4. Marchenko D., Matvyeyeva K. Investigation of the process of surfacing and vibration deformation during the restoration of plowshares and discs of tillage machines. Problems of tribology. 2021. Vol. 102, no. 4. P. 34–41. URL: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-102-4-34-41>
5. Rao G., Chaudhary H., Sharma A. Design and analysis of vibratory mechanism for tillage application. De Gruyter Brill. URL: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/opag-2018-0048/html>
6. Mak J., Chen Y. Simulation of draft forces of a sweep in a loamy sand soil using the discrete element method. Canadian biosystems engineering. technical note. 2014. Volume 56. P. 21–27. URL: <https://library.csbe-scgab.ca/docs/journal/56/C14202.pdf>.
7. Ryaboshapka V., Zharskyi M., Zharskyi R. Increasing the efficiency of operation of trailed soil tillage machine units. Vibrations in engineering and technology. 2023. No. 4(111). P. 75–80.
8. Al-Rajabo S., Hilal Y. Y., Rajab R. H. Investigation on the application of subsoiler vibration to reduce the energy requirement. IOP conference series: earth and environmental science. 2021. Vol. 653, no. 1. P. 012040. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/653/1/012040>.
9. Modeling the interaction of soil and a vibrating subsoiler using the discrete element method / Y. Wang et al. Computers and electronics in agriculture. 2020. Vol. 174. P. 105518. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105518>.

Загнітко Ярослав Віталійович – аспірант кафедри «Галузеве машинобудування», Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: yaroslavzagnitko94@gmail.com.

Науковий керівник: Поліщук Олександр Васильович – к.т.н., доц. кафедри БЖДПБ, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: polischuk@vntu.edu.ua.