

Артёмов М. П.<sup>1</sup>,  
Анікєєв О. І.<sup>1</sup>,  
Пастушенко А. С.<sup>2</sup>,  
Калюжний О. Д.<sup>1</sup>,  
Циганенко М. О.<sup>1</sup>,  
Пушкаренко О. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна  
<sup>2</sup>ВП НУБіП України "Бережанський агротехнічний інститут", м. Бережани, Україна  
**E-mail:**  
artiomovprof@ukr.net

## ОЦІНКА ДИНАМІКИ НАВАНТАЖЕННЯ ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА В СИСТЕМІ ГРУНТООБРОБКИ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-201-212>

УДК 631.31

*Артёмов М.П., Анікєєв О.І., Пастушенко А.С., Калюжний О.Д., Циганенко М.О., Пушкаренко О.Ю. Аналіз динаміки навантаження глибокорозпушувача в системі ґрунтообробки.*

**Анотація.** Орієнтація сучасного сільського господарства на впровадження енергоощадних, раціональних та екологічно безпечних агротехнологій. Останнім часом дедалі більше уваги приділяється збереженню родючості сільськогосподарських земель. Однією з актуальних проблем, що постають перед аграрними підприємствами та фермерами, є надмірне ущільнення ґрунту. Ця проблема зумовлена зростанням масогабаритних характеристик сільськогосподарської техніки, що призводить до ущільнення не лише орного, а й підорного шару ґрунту. Глибина ущільнення залежить від низки чинників, серед яких: маса тракторів, кількість проходів техніки, вологість, тип і фізичний стан ґрунту. Окрім того, інтенсивна оранка на сталій глибині спричиняє формування так званої «плужної підшви», твердість якої перевищує 3,5 МПа. Такий стан ґрунту перешкоджає капілярному підняттю вологи з глибших шарів, що негативно позначається на водозабезпеченні корневих систем сільськогосподарських культур. Одним із ефективних способів боротьби з ущільненням ґрунту є глибоке розпушування (чизелювання), яке також відоме як вертикальний обробіток. Ця технологія сприяє покращенню водно-повітряного режиму ґрунту й, за певних умов, може слугувати альтернативою традиційній оранці. У даній публікації розглядається динаміка навантаження на глибокорозпушувальний агрегат, що застосовуються для руйнування ущільнених шарів у сучасних системах обробітку ґрунту. Дослідження проводилось із використанням розробленого в університеті вимірювально-реєстраційного комплексу, який забезпечує моніторинг параметрів навантаження на агрегат в режимі реального часу без необхідності модифікації її конструкції. Такий підхід дозволяє отримати достовірні дані для подальшого удосконалення агротехнічних процесів.

**Ключові слова:** динаміка агрегатів, ущільнення ґрунту, глибокорозпушувач, система обробітку ґрунту, вимірювальний комплекс.

Artiomov M.P., Anikeev O.I., Pastushenko A.S., Kalyuzhnyi O.D., Tsyganenko M.O., Pushkarenko O.Y. *Assessment of load dynamics of subsoiler in tillage system.*

**Abstract.** Modern agriculture is focused on the introduction of energy-saving, rational and environmentally friendly agricultural technologies. Recently, more and more attention has been paid to preserving the fertility of agricultural land. One of the most pressing issues facing agricultural enterprises and farmers is excessive soil compaction. This problem is caused by the increasing weight and size of agricultural machinery, which leads to compaction of not only the arable but also the subsoil layer. The depth of compaction depends on a number of factors, including the weight of tractors, the number of passes of machinery, moisture, soil type and physical condition. In addition, intensive ploughing at a steady depth results in the formation of a so-called 'plough sole' with a hardness of more than 3.5 MPa. This condition of the soil prevents capillary moisture from rising from deeper layers, which negatively affects the water supply of crop root systems. One of the most effective ways to combat soil compaction is deep loosening (chiselling), also known as vertical tillage. This technology helps to improve the water and air regime of the soil and, under certain conditions, can serve as an alternative to traditional ploughing. This publication examines the load dynamics on deep-rippers used to break up compacted layers in modern tillage systems. The study was carried out using a measuring and recording complex developed at the university, which provides real-time monitoring of machine load parameters without the need to modify its design. This approach allows us to obtain reliable data for further improvement of agricultural processes.

**Key words:** aggregate dynamics, soil compaction, deep loosener, tillage system, measuring complex.

### Постановка проблеми

Проблема деградації ґрунтів давно перебуває в центрі уваги міжнародної наукової спільноти та аграріїв усього світу. Зокрема, питання надмірного ущільнення ґрунту є об'єктом пильного вивчення дослідників із країн Європи та Північної Америки вже протягом кількох десятиліть. Так, відповідно до результатів досліджень, проведених фахівцями Університету штату Огайо, близько 85% ущільнення виникає вже після першого проходу техніки. Крім того, встановлено, що в процесі польових робіт техніка впливає на 40–80% площі поля, а на поворотних смугах рівень ущільнення ще вищий через збільшену кількість проходів.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження багатьох зарубіжних авторів були спрямовані на вивчення впливу різних методів обробітку на фізичні властивості ґрунту та його продуктивність (Wang X., Qi J. та ін.; Yadav G. S. та ін.; McGarry D. та ін.) [1–4]. В українському науковому просторі проблема ущільнення ґрунтів набула актуальності лише після здобуття незалежності. Це зумовлено активним розвитком сільського господарства, зростанням парку сучасної сільськогосподарської техніки, зокрема важких тракторів і комбайнів (M.A. Hamza, та ін.; Булгаков В.М. та ін.) [5, 6].

Сучасні трактори, зернозбиральна техніка та великогабаритні транспортні засоби чинять значний тиск на ґрунт, що обумовлено загальною тенденцією до збільшення їхньої маси. Такий вплив спричиняє ущільнення не лише орного шару, а й

глибших горизонтів ґрунту, часто до глибини понад 1 м. Навіть ущільнення верхнього 20-сантиметрового шару здатне істотно знизити врожайність сільськогосподарських культур.

Глибина ущільнення залежить від комплексу чинників: вологості, гранулометричного складу та стану ґрунту, маси технічного засобу, а також кількості проходів (Кохан А.; Diserens E. та ін.) [7, 8].

### Формулювання мети досліджень

Завдання даного дослідження полягає у використанні метода парціальних прискорень для дослідження динаміки ґрунтообробного агрегату у складі енергонасиченого трактора John Deere 9470R та глибокорозпушувача Gaspardo DIABLO-700 через контроль зміни прискорень.

### Результати досліджень

У сучасній практиці вирощування сільськогосподарських культур багато господарств впроваджують технології на власний розсуд, часто ігноруючи основні принципи агротехніки, зокрема правила сівозміни. Недотримання цих вимог, а також хаотичне переміщення тракторів, комбайнів і вантажного транспорту полями – особливо в період підвищеної вологості ґрунту навесні – створюють передумови для формування ущільненого шару ґрунту, відомого як плужна підшва. Цей шар характеризується високими показниками твердості, що негативно впливає на розвиток кореневої системи рослин. Ранньовесняні обробки ґрунту в умовах надмірної вологості є особливо ризикованими, оскільки сприяють інтенсивному переущільненню (Janulevičius A., та ін.; Медведєв В. та ін.) [9–11].

Для підтримання оптимальної структури ґрунту та збереження його родючості необхідно здійснювати внесення органічних добрив, а також систематично контролювати показники твердості й щільності ґрунтового профілю.



Рис. 1. Твердомір Рєвякіна для визначення твердості ґрунту.

Визначення твердості ґрунту здійснюється за допомогою твердомірів на глибині, яка відповідає глибині виконання відповідної технологічної операції. Існують два

основні методи визначення твердості: органолептичний та інструментальний. У другому випадку застосовується твердомір типу «твердомір Ревякіна» (рис. 1), який дозволяє фіксувати показники твердості за шкалою, що відображається на папері олівцем. Отримані дані дозволяють розраховувати значення твердості в ґрунтовому шарі на глибині від 0 до 400 мм, що є ключовим для аналізу ефективності виконаних агротехнічних операцій.

У ході дослідних робіт, проведених на території господарства ТОВ «Трайгон Фармінг Харків» Богодухівської громади Харківської області, було здійснено вимірювання твердості ґрунту перед виконанням планового глибокого розпушування (табл. 1).

Таблиця 1

Стан ґрунту під час проведення досліджень		
Стан ґрунту	Одиниця вимірювання	Показник
твердість у шарах, см.		
0 – 5	МПа	0.85
5 – 10	МПа	1.87
15 – 20	МПа	2.45
25 - 30	МПа	3.22
вологість ґрунту в шарах, см		
0 – 5	%	17.05
5 – 10	%	20.02
15 – 20	%	23.01
25 - 30	%	28.03

Господарство спеціалізується на рослинництві, а застосовувана в ньому система обробки ґрунту передбачає періодичне виконання глибокого розпушування. Такий агротехнічний прийом дозволяє руйнувати ущільнений підповерхневий шар (ґрунтову підстилку), що утворюється внаслідок інтенсивної експлуатації полів, і сприяє покращенню фізичної структури ґрунту та запобіганню його подальшому ущільненню.

З урахуванням результатів досліджень, проведених М. Вавіловим на базі Полтавської державної дослідної станції, було підтверджено позитивний вплив глибокого розпушування на продуктивність сільськогосподарських культур. На підставі цих даних у господарстві було прийнято рішення про впровадження машин для глибокого розпушування з метою оптимізації ґрунтових характеристик і підвищення врожайності. Вибір методу основного обробки ґрунту є особливо важливим, оскільки він впливає на ефективність накопичення вологи, що, своєю чергою, дозволяє реалізувати генетичний потенціал сучасних сортів і гібридів (Кохан А.) [7].

Для протидії ущільненню ґрунту у господарстві застосовують як глибоке розпушування, так і оранку ґрунту. Однією з переваг глибокого розпушування є збереження до 75% поживних решток на поверхні поля після обробки, що відіграє важливу роль у зниженні втрат вологи та захисті ґрунту від ерозійних процесів. Крім того, поєднання розпушування з перемішуванням поживних решток у верхньому шарі значно підвищує здатність ґрунту до водопоглинання (Kozicz, J.) [12].

Серед усього спектру ґрунтообробної техніки найбільшим навантаженням під час виконання агротехнічних операцій піддаються чизельні плуги та агрегати для глибокого розпушування (рис.2). Навіть незначні зміни фізико-механічних властивостей ґрунту під час обробки можуть суттєво вплинути на якість виконання операцій. Водночас ґрунтообробка має низку відомих переваг, серед яких — зменшення витрат

паливно-мастильних матеріалів і зниження загальної енергоємності основного обробітку.



Рис. 2. Грунтообробний агрегат John Deere 9470R+ Gaspardo DIABLO-700.

Глибоке розпушування є економічно вигідною альтернативою традиційній відвальній оранці, частка використання якої в сучасних господарствах поступово скорочується. З огляду на це, виникає необхідність у детальному дослідженні реальних навантажень на глибокорозпушувальні агрегати в процесі виконання даної технологічно складної операції.

Тяговий опір плугів-сирців та інших розпушувальних знарядь, що функціонують на різних глибинах обробітку, залежить від ряду параметрів. Ці залежності можуть бути описані за допомогою аналітичного виразу, подібного до раціональної формули, яка використовується для моделювання тягових характеристик (Ветохін В.) [13].

$$R = fG + kS_k + \varepsilon S_k V^2 \quad (1)$$

де  $f$  – коефіцієнт опору руху знаряддя у борозні;

$G$  – вага знаряддя, Н;

$k$  – питомий опір ґрунту, Н/м<sup>2</sup>;

$S_k$  – площа поперечного перерізу розпушеного шару ґрунту, м<sup>2</sup>;

$\varepsilon$  – коефіцієнт, що залежить від форми робочих органів, властивостей ґрунту та розміру формування;

$V$  – робоча швидкість руху агрегату, м/с.

Водночас запропонована методика визначення тягового опору не враховує складові характеристики ґрунту. У зв'язку з цим Н.В. Щучкін розробив альтернативний підхід, який базується на визначенні коефіцієнта питомого опору ґрунту залежно від його твердості та коефіцієнта зовнішнього тертя між ґрунтом і сталеву поверхнею робочого органу. Основою для побудови цієї методики стала раціональна формула, прототипом якої є вираз, запропонований (Ветохін В.) [13].

$$R = fG + mxab, \quad (2)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ґрунту об сталь;

$G$  – вага ґрунтообробного знаряддя, Н;

$m$  – коефіцієнт, що відображає залежність питомого опору від твердості ґрунту;

$x$  – твердість орного шару ґрунту, Па;

$a$  – глибина обробітку ґрунту, м;

$b$  – ширина захвату глибокорозпушувача, м.

Для виконання інженерних розрахунків розглянемо двомасову динамічну систему, яка моделює ґрунтообробний агрегат (Артёмов М.) [14] з чотирма ступенями свободи. Ця система включає:

- $\zeta$  та  $\eta$  – поздовжню та поперечну координати центра мас агрегату відповідно;
- $\psi_1$  – кутовий відхил курсу рами трактора відносно осі OX;
- $\psi_2$  – кут повороту глибокорозпушувача відносно осі його з'єднання з трактором.

Для опису руху динамічної моделі (рис.3) застосовано рівняння Лагранжа другого роду. З метою розв'язання задачі проводиться вимірювання прискорень у двох контрольних точках  $M_1$  та  $M_2$ , що змінюються як функції часу в інтервалі  $(0, t)$ . Просторові координати зазначених точок є відомими як у глобальній (нерухомій) системі координат  $(XoYo)$ , так і в локальній, жорстко пов'язаній із машино-тракторним агрегатом, системі  $(\bar{x}\bar{y})$ .

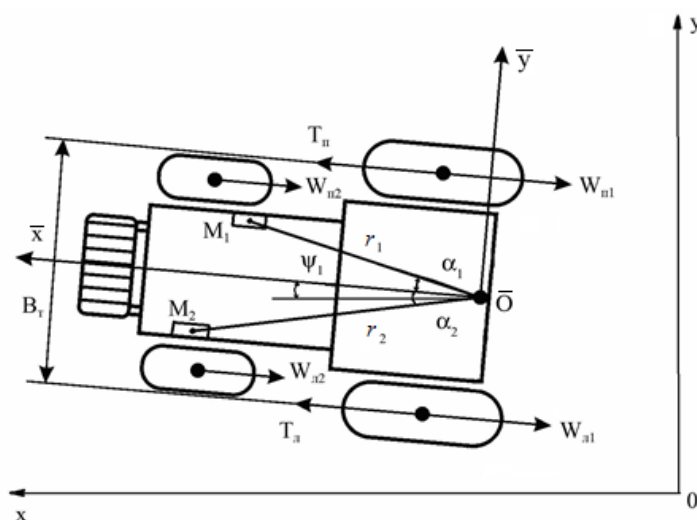


Рис. 3. Розрахункова модель із розташуванням датчиків у контрольних точках  $M_1$  і  $M_2$  на тракторі.

Позначимо компоненти прискорень у цих точках як  $a_1$  та  $a_2$ . Наступним кроком є встановлення зв'язку між компонентами прискорень і узагальненими координатами  $\zeta$  та  $\eta$ . У випадку плоскопаралельного руху системи прискорення будь-якої точки  $M$  можна подати як геометричну суму трьох складових: поступального прискорення центра мас, обертального прискорення навколо центра мас та доцентрового прискорення.

$$\vec{a}_m = \vec{a}_o + \vec{a}_b + \vec{a}_c \quad (3)$$

де  $\vec{a}_o$  – прискорення в точці,

$\vec{a}_b$  – прискорення обертання,

$\vec{a}_c$  – відцентрове прискорення.

На основі перетворень, виконаних над вимірними параметрами машини та рівняння (3), отримуємо наступну систему рівнянь

$$\Delta a_x = -\Delta_2 \ddot{\psi}_1 + \Delta_1 \dot{\psi}_1^2, \quad (4)$$

$$\Delta a_y = -\Delta_1 \ddot{\psi}_1 - \Delta_2 \dot{\psi}_1^2, \quad (5)$$

де, відповідно, у рівняннях (4) та (5) ми вводимо позначення

$$\Delta a_x = a_{x1} - a_{x2}, \quad \Delta a_y = a_{y1} - a_{y2}, \quad (6)$$

$$\Delta_1 = r_2 \cos \alpha_2 - r_1 \cos \alpha_1, \quad \Delta_2 = r_2 \sin \alpha_2 + r_1 \sin \alpha_1.$$

Після підстановки усіх складових прискорень та параметрів машини, а також проведення необхідних математичних перетворень і спрощень, отримано лінеаризовану систему рівнянь. Ця система дає змогу здійснити аналітичне визначення динамічних силових характеристик глибокорозпушувача в процесі виконання агротехнічної операції.

$$\begin{cases} m\ddot{\xi} = T - W_1 - W_2 - R_x + R_y\psi_2; \\ m\ddot{\eta} + m_1b_1\ddot{\psi}_1 + m_2b_2\ddot{\psi}_2 = (T - W_1 - W_2)\psi_1 - R_x\psi_2 - R_y; \\ m_1b_1\ddot{\eta} + 2J_1\dot{\psi}_1 + C(\psi_1 - \psi_2) = 0; \\ m_2b_2\ddot{\eta} + 2J_2\dot{\psi}_2 - C(\psi_1 - \psi_2) = R_y l - R_x l \psi_2; \end{cases} \quad (7)$$

Для забезпечення достовірності результатів розрахунків скористаємося методикою визначення сили опору робочого органу глибокорозпушувача, запропонованою С. Лещенком та співавт. [15]. У цій моделі враховуються нормальні реакції, сили тертя, швидкісні характеристики руху агрегату, а також інші впливові чинники, що визначають величину загального тягового опору під час роботи знаряддя.

$$R = \sum (N_H + N_R + N_W) + \sum \left[ fG + f_1(N_H + N_R + N_W) + \right. \\ \left. + 2f_L(R_{HB} + R_{LR} + R_{LW}) \right] + \\ + (K + \varepsilon_B V^2 + \varepsilon_W V^2)(Bh_R + Sh_B + Sh_W), \quad (8)$$

де  $N_H$  – горизонтальні складові сил, що діють на долото, Н;

$N_R, N_W$  – опір руху стійки та крил відповідно фронтальний опір, Н;

$fG$  – сила тертя по дну борозни, Н;

$f_1(N_H + N_R + N_W)$  – горизонтальна складова сил тертя від нормальних сил, Н;

$2f_L(R_{HB} + R_{LR} + R_{LW})$  – горизонтальна та бічна складові сил тертя по бічних поверхнях долота, стійки та крил відповідно, Н;

$K$  – коефіцієнт, що характеризує здатність ґрунту чинити опір деформації;

$\varepsilon_B, \varepsilon_W$  – коефіцієнти, що залежать від форми робочої поверхні долота і крил відповідно, властивостей та розміру ділянки ґрунту, деформованої відповідними елементами;

$(Bh_R + Sh_B + Sh_W)$  – сума активних площ стійки, долота та крил, м<sup>2</sup>.

Після підстановки рівняння (8) у систему рівнянь (7) та програму вимірювально-реєстраційного комплексу, отримуємо результати динаміки сил, що діють на робочі органи. Контрольні випробування були проведені на полі з агрофоном – стерня зернових культур.

У сучасних дослідженнях все ширше застосовуються різноманітні вимірювальні комплекси, які забезпечують реєстрацію діючих навантажень у дистанційному режимі без необхідності втручання в конструкцію машин [16]. Такі підходи підвищують точність експериментальних даних і дозволяють отримувати достовірні характеристики динаміки роботи агрегатів у польових умовах.

У рамках проведеного експерименту датчики вимірювально-реєстраційного комплексу, розробленого колективом науковців ХНТУСГ імені Петра Василенка та ХНАДУ (рис. 4) [16], були встановлені на тракторі в двох точках: ліворуч спереду та праворуч ззаду на рамі. Вимірювання проводилися на контрольній ділянці довжиною 460 м. Швидкість руху агрегату в процесі експерименту змінювалася в межах 8,5–9,6 км/год, при цьому глибина обробки ґрунту складала 45 см.

Отримані дані з акселерометрів зберігалися у пам'яті комп'ютера для подальшої обробки. Особливу цінність для аналізу динамічних характеристик має графік зміни поздовжніх прискорень трактора (вісь  $x$ ), залежно від часу, фрагмент якого представлено на рисунку 5. Ця частина графіка дозволяє детально проаналізувати

реакцію машини на зміну фізико-механічних властивостей ґрунту та зміну умов роботи.

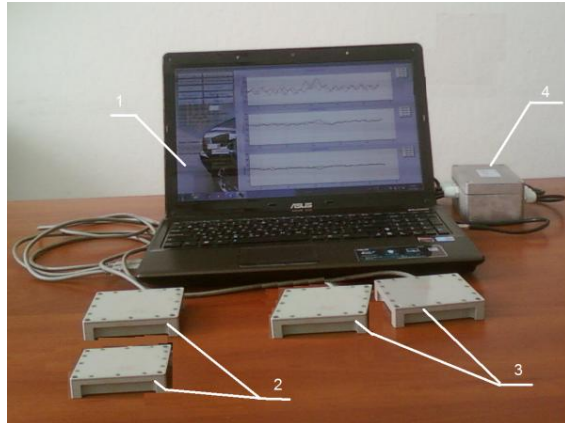


Рис. 4 Мобільний вимірювально-реєстраційний комплекс: 1 – ПК з авторською програмою; 2, 3 – датчики прискорень MMA 7260QT; 4 – перетворювач для тензоланки

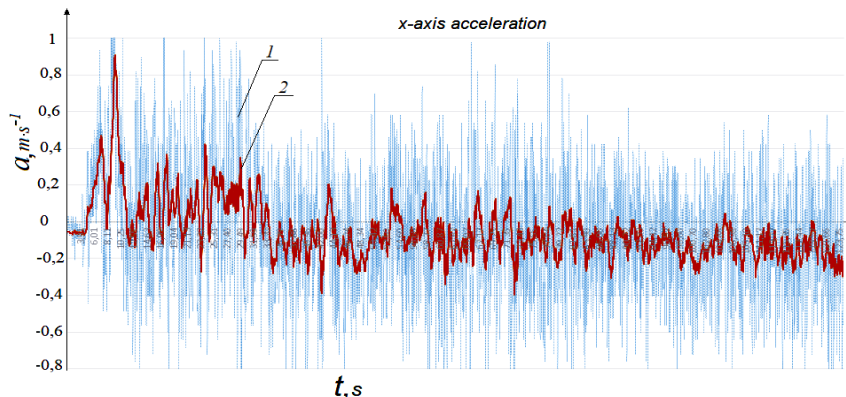


Рис. 5. Залежність поздовжнього прискорення ґрунтообробного агрегату John Deere 9470R+ Gaspardo DIABLO-700 від часу (вісь  $x$ ) 1 – фактичний сигнал; 2 – сигнал, що пройшов через фільтр Баттерворта.

На рис. 5 представлено масив експериментальних даних, що відображає зміну прискорень уздовж осі  $x$ , тобто в напрямку руху машино-тракторного агрегату. Особливу увагу приділено відфільтрованій динаміці прискорень (3), яку було виділено окремо. Це зумовлено високою частотою змін даних – 50 вимірювань на секунду, що дозволяє отримати детальну картину змін динамічних навантажень у реальному часі.

### Обговорення

У даній публікації представлено результати дослідження динаміки навантаження сільськогосподарської машини під час виконання агротехнічної операції. Запропонований підхід дозволяє безпосередньо візуалізувати процес зміни навантаження на робочі органи, що відрізняє його від існуючих розрахункових методик, заснованих на статистичних характеристиках сільськогосподарських машин і агрегатів [2,3,5,7].

Так, у роботі [15] проведено аналітичні розрахунки впливу параметрів глибокого розпушувача на якість обробки ґрунту. Проте у вказаному дослідженні відсутній

аналіз реальних динамічних навантажень, яких зазнає знаряддя у процесі роботи в складі машино-тракторного агрегату. У цьому контексті результати, отримані експериментальним шляхом, мають важливе практичне значення для подальшого вдосконалення конструкцій сільськогосподарських машин і агротехнічних процесів.

За результатами цих розрахунків на основі статистичних даних ( $R_s$ ) та вимірювань реєстраційно-вимірювального комплексу ( $R_D$ ) нами було побудовано графік динаміки сили опору глибокорозпушувача залежно від часу (рис. 6).

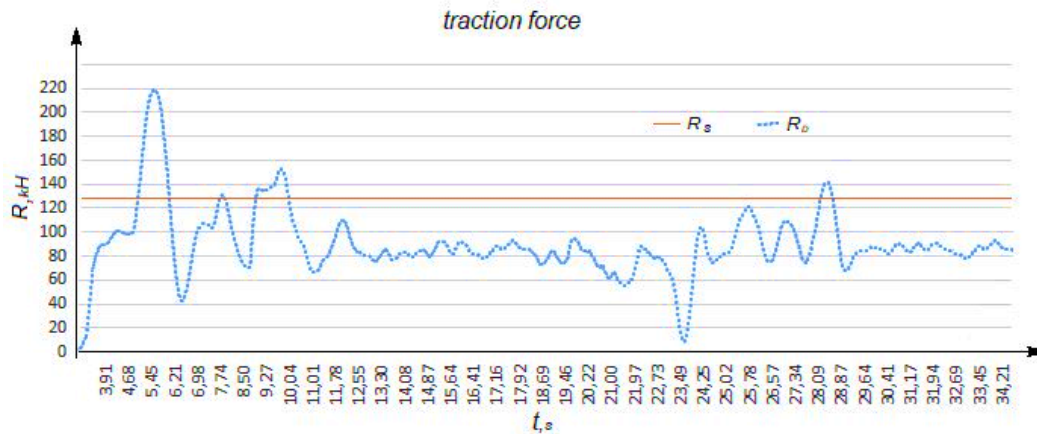


Рис. 6. Динаміка зміни сили опору глибокого розпушувача:  $R_s$  – теоретична сила опору;  $R_D$  – експериментальна сила опору.

Графік показує динаміку сили опору глибокого розпушувача в момент від початку агротехнічної операції до режиму усталеного руху. Початок графіка чітко демонструє процес переходу з одного стану (спокою) до стану рівномірного руху, більш яскраво демонструє динаміку навантаження. У початковий момент динамічний опір вищий за теоретично розрахований, практично на 60%, а потім після стабілізації руху коливається в межах 78...95 кН, що відповідає 55...70% від теоретично розрахованого значення. Статистичну обробку графіка прискорення машини проводили за допомогою програмного пакету MATLAB 7.0.

## Висновки

1. Для ефективної заміни традиційної системи обробітку ґрунту, що базується на застосуванні плужної оранки, доцільно впроваджувати ґрунтозахисні, енергозберігаючі та екологічно безпечні технології обробітку ґрунту і вирощування сільськогосподарських культур. Використання технологій глибокого розпушування сприяє збереженню родючого шару ґрунту та зниженню енерговитрат на одиницю продукції рослинництва.

2. Проведені експериментальні дослідження показали, що на початку роботи агрегату динамічний опір перевищує теоретично розрахований статистичний опір орієнтовно на 60%. Після стабілізації руху тягове навантаження коливається в межах 78...95 кН, що відповідає 55...70% від розрахункового значення. Це дозволяє оптимізувати швидкісний режим роботи агрегату, забезпечити раціональне використання тягових можливостей трактора та зменшити витрати пального на одиницю виконаної роботи.

3. У результаті використання вимірювально-реєстраційного комплексу вдалося здійснити динамічний аналіз сил опору глибокорозпушувача з урахуванням дії сили

тертя, нормальних реакцій та швидкості руху машини. Вимірювання проводились у реальному часі без втручання у конструкцію агрегату, що дозволяє застосовувати методику в умовах реального агровиробництва.

#### Список використаних джерел

1. Electronic resource - <https://blog.bridgestone-agriculture.eu/what-you-need-to-know-about-soil-compaction-caused-by-your-tractor-tyres/> Free access.
2. Wang, X., Qi, J., Liu, B., Kan, Z., Zhao, X., Xiao, X., & Zhang, H. (2020). Strategic tillage effects on soil properties and agricultural productivity in the paddies of Southern China. *Land Degradation & Development*, 31(10), 1277-1286. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3519>.
3. Yadav, G. S., Lal, R., Meena, R. S., Babu, S., Das, A., Bhowmik, S. N., Datta, M., Layak, J., & Saha, P. (2019). Conservation tillage and nutrient management effects on productivity and soil carbon sequestration under double cropping of rice in north eastern region of India. *Ecological Indicators*, 105, 303-315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.071>.
4. McGarry, D. Tillage and soil compaction. In: Garcí'a-Torres, Benites, L., Martí'nez-Vilela, A. (Eds.), *Proceedings of the I World Congress on Conservation Agriculture, Keynote Contributions*, vol. 1, October 1–5, 2001, XUL, Co'rdoba, Madrid, pp. 281–291.
5. M.A. Hamza, W.K. Anderson Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research Volume 82, Issue 2, June 2005*, pp 121-145
6. Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H., Nadykto V., Kyurchev V. Maximum Admissible Slip of Tractor Wheels Without Disturbing the Soil Structure. *Applied Science*, 2021. V. 11. P. 1–10.
7. Кохан А.В. Эффективность разных способов обработки грунта (Efficiency of different tillage methods). *Новейшие агротехнологии; выпуск №1 (4) 2016 электронное научное издание. new\_agro@ukr.net*.
8. Diserens E., De'fossez P., Duboisset A., Alaoui A. Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. *Biosystems Engineering*, 110, 2011, pp. 73-82.
9. Janulevičius A., Juostas A., Pupinis G. Estimation of tractor wheel slippage with different tire pressures for 4WD and 2WD driving systems. *Engineering for rural development: 18-th international scientific conference proceedings*, vol. 18, 2019, pp. 88-93.
10. Медведев В., Лындина Т., Лактионова Т. Плотность сложения почв. Генетический, экологический и агрономический аспекты (Soil density. Genetic, ecological and agronomic aspects). Харків, 2004, 244 p.
11. Standard DSTU 4521:2006. *Agricultural mobile equipment. Rules for the action of running systems on the soil*. Kyiv, 2006.
12. Kozicz, J., Compacting soil with traction mechanisms of aggregates at cultivating cereals and root crops. *Post. Nauk Rol.* 1996. 4, 51–64.
13. Ветохин В.И. Системные и физико-механические основы проектирования рыхлителей почвы: автореф. дис. д-ра техн. наук. (System and physical-mechanical bases of soil loosener design). Глеваха, 2010. 43 с.
14. Артёмов М.П. Динамічна стабільність мобільних сільськогосподарських агрегатів: автореф. дис. д-ра техн. наук. (Dynamic stability of mobile agricultural units). Харків. ХНТУСГ, 2014. 44 с.
15. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Вплив конструктивно-технологічних параметрів глибокорозпушувача на обробіток ґрунту. Конструювання виробництва та експлуатація сільськогосподарських машин (The influence of structural

and technological parameters of the deep loosener on soil cultivation) Кропивницький. 2016, вип.46. С.78 – 87.

16. N. Artiomov, R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkov, A. Ayubov Innovative approach to agricultural machinery testing. Latvia University of Life Sciences and Technologies, 20<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for rural development Proceedings, Volume 20 May 26-28, 2021. С.451-456.

## References

1. Electronic resource - <https://blog.bridgestone-agriculture.eu/what-you-need-to-know-about-soil-compaction-caused-by-your-tractor-tyres/> Free access.
2. Wang, X., Qi, J., Liu, B., Kan, Z., Zhao, X., Xiao, X., & Zhang, H. (2020). Strategic tillage effects on soil properties and agricultural productivity in the paddies of Southern China. *Land Degradation & Development*, 31(10), 1277-1286. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3519>.
3. Yadav, G. S., Lal, R., Meena, R. S., Babu, S., Das, A., Bhowmik, S. N., Datta, M., Layak, J., & Saha, P. (2019). Conservation tillage and nutrient management effects on productivity and soil carbon sequestration under double cropping of rice in north eastern region of India. *Ecological Indicators*, 105, 303-315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.071>.
4. McGarry, D. Tillage and soil compaction. In: Garcí'a-Torres, Benites, L., Martí'nez-Vilela, A. (Eds.), *Proceedings of the I World Congress on Conservation Agriculture, Keynote Contributions*, vol. 1, October 1–5, 2001, XUL, Co'rdoba, Madrid, pp. 281–291.
5. M.A. Hamza, W.K. Anderson Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* Volume 82, Issue 2, June 2005, pp 121-145
6. Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H., Nadykto V., Kyurchev V. Maximum Admissible Slip of Tractor Wheels Without Disturbing the Soil Structure. *Applied Science*, 2021. V. 11. R. 1–10.
7. Kokhan A.V. Efektyvnist riznykh sposobiv obrobittu gruntu (Efficiency of different tillage methods) / Noveishye ahrotekhnolohyy; vyypusk №1 (4) 2016 elektronnoe nauchnoe yzdanye. [new\\_agro@ukr.net](mailto:new_agro@ukr.net) (In Ukrainian)
8. Diserens E., De'fossez P., Duboisset A., Alaoui A. Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. *Biosystems Engineering*, 110, 2011, pp. 73-82.
9. Janulevičius A., Juostas A., Pupinis G. Estimation of tractor wheel slippage with different tire pressures for 4WD and 2WD driving systems. *Engineering for rural development: 18-th international scientific conference proceedings*, vol. 18, 2019, pp. 88-93.
10. Medvedev V., Лындина Т., Лактыонова Т. Plotnost slozheniya pochv. Henetycheskyi, ekolohycheskyi y ahronomycheskyi aspekty (Soil density. Genetic, ecological and agronomic aspects). Kharkiv, 2004, 244 p. (In Ukrainian)
11. Standard DSTU 4521:2006. Agricultural mobile equipment. Rules for the action of running systems on the soil. Kyiv, 2006.
12. Kozicz, J., Compacting soil with traction mechanisms of aggregates at cultivating cereals and root crops. *Post. Nauk Rol.* 1996. 4, 51–64.
13. Vetokhyn, V.Y. Systemnye y fizyko-mekhanicheskiye osnovy proektyrovaniya ryzhlytelei pochvy: avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk / V.Y. Vetokhyn. (System and physical-mechanical bases of soil loosener design) – Hlevakha, 2010. – 43 s. (In Ukrainian)
14. Artomov M.P. Dynamichna stabilnist mobilnykh silskohospodarskykh ahrehativ: avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk / M.P. Artomov (Dynamic stability of mobile agricultural units) – Kh.:KhNTUSH, 2014.;44s. (In Ukrainian)

15. Leshchenko S.M., Salo V.M., Petrenko D.I. Vplyv konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametriv hlybokorozpushuvacha na obrobitok hruntu / S.M. Leshchenko, V.M. Salo, D.I. Petrenko // Konstruiuvannia vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn (The influence of structural and technological parameters of the deep loosener on soil cultivation) Kropyvnytskyi. 2016, vyp.46. – S.78 – 87. (In Ukrainian)

16. N. Artiomov, R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkov, A. Ayubov Innovative approach to agricultural machinery testing // Latvia University of Life Sciences and Technologies, 20th International Scientific Conference Engineering for rural development Proceedings, Volume 20 May 26-28, 2021. S.451-456.