

## АНОТАЦІЯ

Діченко Віталій Юрійович «Обґрунтування параметрів конструкції чизеля-глибокородзпущувача з використанням методів моделювання технологічного процесу».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра з агроінженерії за освітньою програмою «Системи точного землеробства» зі спеціальності 208. Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

У кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні основи та практичні аспекти вдосконалення конструктивних параметрів чизеля-глибокородзпущувача з використанням методів моделювання технологічного процесу взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем.

У роботі розроблено математичну модель прогнозування фракційного складу ґрунту під час глибокого розпушування, що враховує особливості процесу подрібнення. Під час моделювання встановлено, що фракційний склад обробленого шару може описуватися експоненціальною або лінійною залежністю. Вдосконалено методику вимірювання тягового опору робочих органів та систему показників, що забезпечує комплексну оцінку ефективності роботи ґрунтообробних машин різних конструкцій.

Експериментальні дослідження підтвердили високу відповідність математичної моделі реальним умовам роботи та доцільність обраного конструктивного рішення. Встановлено, що середній тяговий опір дослідного зразка є на 10–12 % нижчим порівняно з серійним аналогом, що свідчить про зменшення енергетичних витрат при збереженні якості технологічного процесу. У результаті широких польових досліджень визначено оптимальне відношення довжини долота до його ширини, яке становить 3,6 і є ключовим конструктивним параметром.

Розрахункові дані засвідчили, що впровадження запропонованої конструкції дозволяє отримати річний фінансовий ефект у розмірі 37 388,20 грн за сезонного навантаження 380 га, а термін окупності інвестицій становить лише 0,1 року. Розробка сприяє підвищенню ефективності використання глибокородзпущувачів, зниженню енергетичних витрат, покращенню структури ґрунту та підвищенню продуктивності сучасних сільськогосподарських технологій.

Ключові слова: чизель-глибокородзпущувач, моделювання процесу, тяговий опір, фракційний склад ґрунту, конструктивні параметри, енергоефективність, продуктивність, економічна ефективність.

## ABSTRACT

Dichenko Vitalii Yuriiovich «Justification of Design Parameters of a Chisel Deep Ripper Using Technological Process Modeling Methods».

Qualification work for the degree of Master in Agri-engineering under the educational program “Precision Agriculture Systems” in the specialty 208. Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The qualification work examines the theoretical foundations and practical aspects of improving the design parameters of a chisel deep ripper using modeling methods of the technological process of interaction between working tools and the soil environment. Modern scientific approaches, regulatory requirements, and development trends of deep tillage machinery were analyzed. Special attention was given to improving energy efficiency, reducing draft resistance, and enhancing soil cultivation quality.

A mathematical model for predicting soil fractional composition during deep loosening was developed, taking into account the specific features of the soil fragmentation process. Modeling results showed that the distribution of soil aggregates in the treated layer can be described by exponential or linear functions. The methodology for measuring draft resistance was improved, and a system of indicators was proposed to comprehensively evaluate the performance of soil-tillage machines of various designs.

Experimental studies confirmed the suitability of the developed mathematical model and the effectiveness of the proposed design solution. It was established that the average draft resistance of the experimental tool is 10–12% lower compared to the serial model, indicating reduced energy consumption while maintaining process quality. Extensive field tests determined the optimal ratio of chisel point length to width as 3.6, which is a critical structural factor.

Economic analysis demonstrated that implementation of the proposed design yields an annual financial effect of 37,388.20 UAH with a seasonal workload of 380 ha, and the payback period of the investment is only 0.1 year. The proposed improvement enhances the efficiency of deep loosening tools, reduces energy consumption, improves soil structure, and increases the productivity of modern agricultural technologies.

Keywords: chisel deep ripper, process modeling, draft resistance, soil fractional composition, structural parameters, energy efficiency, productivity, economic effectiveness.

## **ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАГАЛЬНОГО СТАНУ ПИТАННЯ</b>	<b>7</b>
1.1 Огляд робочих органів з одним стояком	7
1.2 Огляд робочих органів комбінованого типу	11
1.3 Глибокородзпущувачі власного виробництва	12
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b>	<b>16</b>
2.1 Теоретичні основи та математична модель обробітку ґрунту	16
2.2 Дослідження початкового етапу кришення	19
2.3 Дослідження фінального етапу кришення	23
2.4 Дослідження оптимальних конструктивних параметрів долота	25
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>	<b>28</b>
3.1 Конструкція дослідницької установки	28
3.2 Програма досліджень	29
3.3 Обґрунтування власної методики досліджень	30
3.4 Результати досліджень та експериментів	35
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ</b>	<b>44</b>
<b>РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>48</b>
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>52</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b>	<b>54</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	<b>57</b>

## ВСТУП

Сучасний розвиток аграрного виробництва в Україні вимагає впровадження ефективних та ресурсозберігаючих технологій обробітку ґрунту. Одним із ключових завдань є збереження та відновлення його родючості, що особливо актуально в умовах інтенсивного використання земельних ресурсів, кліматичних змін та зниження природної продуктивності ґрунтів.

Одним із найбільш ефективних знарядь для вирішення зазначених завдань є чизелі-глибокорозпушувачі. Їх застосування дозволяє здійснювати глибоке розпушування ґрунту без обороту пласта, покращувати водоповітряний режим, сприяти нагромадженню вологи та активізувати біологічні процеси в ґрунті. Це має особливе значення для України, де значна частина сільськогосподарських угідь представлена чорноземами, що піддаються деградації внаслідок надмірного механічного обробітку та кліматичних навантажень.

Разом з тим ефективність роботи чизеля-глибокорозпушувача значною мірою залежить від його конструктивних параметрів. Неправильний вибір геометрії робочих органів може призвести до надмірних енергетичних витрат, швидкого зношування елементів і недостатньої якості обробітку. Саме тому виникає потреба у науковому обґрунтуванні параметрів конструкції знаряддя на основі використання сучасних методів моделювання технологічного процесу. Це дозволить оптимізувати роботу агрегатів, зменшити витрати пального, підвищити продуктивність праці та забезпечити стабільність агротехнічних показників.

Таким чином, дослідження, спрямовані на обґрунтування параметрів конструкції чизеля-глибокорозпушувача із застосуванням методів моделювання, є надзвичайно актуальними та мають важливе практичне значення для підвищення ефективності агровиробництва в Україні.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЗАГАЛЬНОГО СТАНУ ПИТАННЯ

#### 1.1 Огляд робочих органів з одним стояком

Застосування чизельного обробітку ґрунту спрямоване переважно на поліпшення гідравлічних і газопровідних властивостей ґрунту.

Провівши аналіз різноманітних літературних джерел і рекламних проспектів, випущених компаніями-виробниками, ми пропонуємо наступну класифікацію за конструктивним виконанням.

Одинарні робочі органи – це окремі вертикальні елементи, які служать для підняття одного рівня шару на інший. Одинарні робочі органи є невід’ємною частиною загальної конструкції, тому їх розташування та розміри повинні бути ретельно розраховані, щоб забезпечити безпеку та стійкість конструкції.

У цій частині ми розглянемо кілька найбільш вдалих, з нашої точки зору, сучасних дизайнів глибокорозпушувачів.

Під час роботи в ситуаціях, коли стандарт дроблення є мінімальним, або коли інструмент призначений для використання як частини складного механізму, доцільно прибрати «підшву» плуга та використовувати найпростішу форму стояків, як показано на Рис. 1.1.



Рисунок 1.1 - Глибокорозпушувач Diamant

Глибокорозпушувач Diamant має просту конструкцію, в якій використовуються класичні одностійкові робочі органи. Його основна функція полягає в розпушуванні щільно ущільнених глибоких горизонтів глибиною 25-45

см. Осипання нижніх горизонтів, що виникає в результаті цього, безпосередньо пов'язане з вирішенням питань зволоження. Однак розпушувач також створює грубу та грудкувату структуру поверхні, яка потребує подальшої обробки. Тим не менш, ця конструкція може бути корисною для утримання снігу.

У багатьох випадках функціонуючі фізичні структури використовуються ізольовано як складовий компонент більшої об'єднаної структури.

Щоб досягти найвищого рівня подрібнення середнього та верхнього шарів, використовується безліч об'єднаних робочих одиниць із однією стійкою. Поширений дизайн, який переважно використовується серед місцевих виробників, можна побачити на малюнку 1.2.

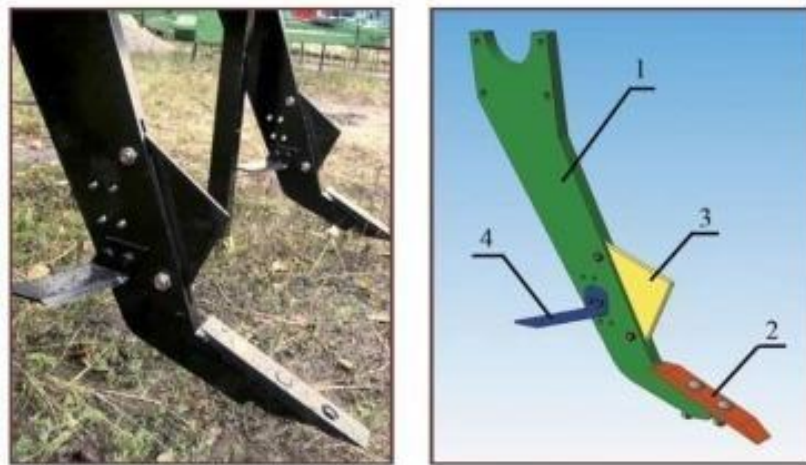


Рисунок 1.2 – Комбінований одностояковий глибокорозпушувач [1]

Робочий механізм робочого органу функціонує наступним чином: долото 2, що складається з ріжучої кромки зі зменшеним кутом атаки та основного корпусу з постійним кутом атаки приблизно 35-40 градусів, виявляється високоефективним у секційному шарі. [2]. Долотний елемент ефективно розділяє шар ґрунту, утворюючи майже пухку призму, яка згодом подрібнюється ножем 3. На завершальному етапі цієї послідовності відбувається подрібнення призми крилом 4.

У [3] дослідники відзначили доцільність біпланової конфігурації для крил (рис. 1.3). Проте підприємством ТМ «ВОСХОД» було проведено дослідження,

яке визначило, що оптимальним рішенням буде виконання одинарного крила еліптичної форми (рис. 1.4).

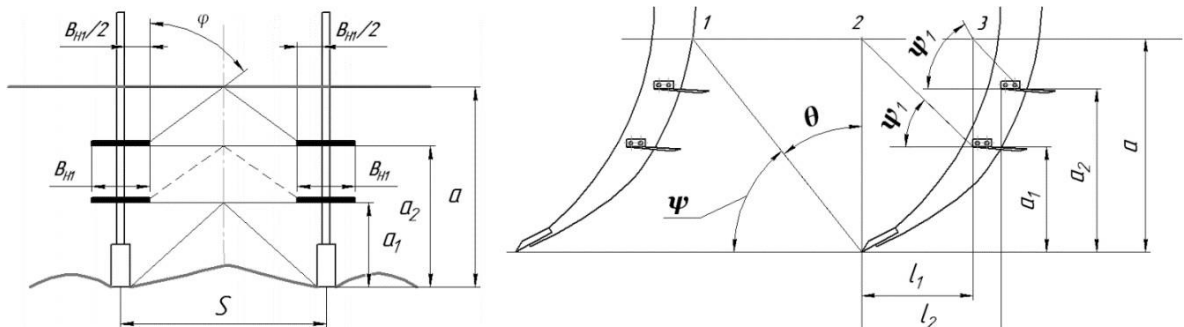


Рисунок 1.3 – Розрахункова схема для розрахунку параметрів дворівневої установки крил



Рисунок 1.4 – Глибокорозпушувач АРГ – 1.7 з еліпсовидними крилами

У деяких випадках виникає необхідність придбати традиційний профіль борозни, який передбачає створення стиснутого шару, як показано на малюнку 1.5.

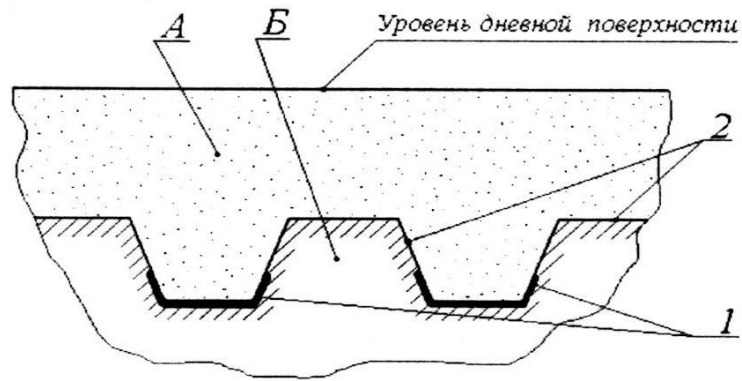


Рисунок 1.5 - Вид класичної борозни при чизельному обробітку [4] :

1 – ущільнене ложе; 2 – гребінь, утворений за рахунок розповсюдження ліній сколу; А – зона суцільного розпушення ; Б – зона материнського ущільнення

Для такого сценарію було розроблено нове рішення у формі стояка, який оснащено долотом для копання, що має форму лопати, як показано на малюнку 1.6.



Рисунок 1.6 – Стояк із лопатовидним долотом

Необхідно створити профіль зі специфічним регулюванням вологи. Це пов'язано з тим, що під час опадів волога здатна безперешкодно проникати в шар. Цей шар повністю неконсолідований і вільний від капілярів, що дозволяє волозі

накопичуватися в ущільненому шарі 1, де вона може використовуватися кореневими системами рослин у разі необхідності. Якщо ложе стає надмірно насиченим, надлишок вологи направляється через мережу капілярів, розташованих на хребті, і спрямовується до нижніх шарів. І навпаки, під час посушливих періодів волога втягується через капіляри з нижніх горизонтів, які потім поповнюють ложе. Цей профіль дозволяє надійно регулювати водний режим.

## **1.2 Огляд робочих органів комбінованого типу**

Долотна обробка – це унікальний метод, який створює грубу зернисту структуру по всьому обробленому профілю, від дна борозни до нижньої поверхні. Однак необхідно підтримувати структуру верхнього і середнього горизонтів відповідно до агротехнічних вимог. Є два можливі рішення цієї проблеми. По-перше, для поверхневого шару рекомендується використовувати окремі ґрунтообробні агрегати, такі як борона або луцильник по сліду чизеля. По-друге, підтримувати середні шари можна за допомогою комбінованих ґрунтообробних агрегатів, які, як правило, складаються з чизельного, дискового та ротаційного кулькових робочих органів. Сучасний комбінований агрегат для роботи, запропонований виробником іспанською фірмою групи Јутра, представлений на рис. 1.7, який рекомендований для використання в надмірно ущільнених ґрунтах.

Загалом, набір такого характеру має потенціал для використання для ґрунтів із різними умовами, за умови використання інструменту з меншою інтенсивністю дії. Важливо визнати, що об'єднані агрегати, які покладаються на знаряддя долотного типу, як правило, мають значну вагу та потребують значних інвестицій для роботи.



Рисунок 1.7 – Комбінований агрегат «Јумра»

### 1.3 Глибокорозпушувачі власного виробництва

Хоча в серійному виробництві доступні численні машини, народні умільці історично покладалися на власні розробки. По суті, цей процес передбачає тиражування усталених технічних рішень. Однак цих майстрів стримують обмежені технічні можливості, що змушує їх шукати інноваційні та інтригуючі рішення. У цій статті ми розглянемо кілька окремих дизайнів, які ми вважаємо особливо захоплюючими.

Очевидно, що розробка нових структур передбачає використання значної частки елементів, запозичених з уже існуючих структур.

Згідно з нашим проектом, початкова ітерація (зображена на рис. 1.8) містить лопатоподібні стояки, які не з'єднані нерухомо, а шарнірно з'єднані на осях. Ця конфігурація дозволяє вручну переводити транспортний засіб у транспортне положення, що передбачає підйом і обертання стояків навколо відповідних осей.



Рисунок 1.8 – Агрегат для глибокого розпушування із лопатовидними робочими органами

Конфігурація, зображена на малюнку 1.9, є імітацією глибокорозпушувача Paraplow, хоча й меншого масштабу, а отже, придатного для використання в смуговому землеробстві. Примітно, що ключовою точкою диференціації є включення долота, розташованого вздовж осі інструменту. За твердженням автора, це доповнення служить для підвищення дробильно-розпушувальних можливостей інструменту.

Важливо відзначити, що існує кілька недоліків, пов'язаних з поточною конструкцією стояка. Одним із таких обмежень є відсутність аналітичного обґрунтування форми стояка, що може призвести до неоптимальної продуктивності. Крім того, стояк виготовляється вручну, що створює значні труднощі при виготовленні та ускладнює забезпечення рівномірності профілю робочої поверхні.



Рисунок 1.9 - Саморобний робочий орган типу Paraplow

Після ретельного вивчення літературних джерел і рекламних матеріалів виробників було встановлено, що комбінований одностійний глибокорозпушувач є перспективним для подальшого використання. Зазвичай одноступінчасті розпушувачі в традиційному виконанні застосовуються для рекультивації земель або при наявності техногенних, порушених ґрунтів. Навпаки, двостійкові глибокорозпушувачі схильні до труднощів експлуатації та технологічних збоїв. Таким чином, вони в основному використовуються як викопувачі столових коренеплодів і цибулевих культур.

### ***Висновки***

Спостереження вказують на переважаючу схильність до включення додаткових елементів для модернізації дизайну конструкцій. Ця тенденція

значною мірою є результатом експериментальних досліджень. Слід зазначити, що аналітична база, яка лежить в основі цієї сфери, залишається суттєво недосконалою.

Переважаючим підходом вітчизняних виробників є копіювання усталених іноземних конструкцій з мінімальною поправкою на ґрунтові умови. Нещодавні дослідження, проведені українськими дослідниками, виявили потенціал для використання методів біоніки для покращення розробки знарядь для обробки ґрунту. Впровадження біонічних структур виявляється особливо вигідним для глибокого розпушення ґрунтів.

Загалом, широко поширеною проблемою в цій галузі є відсутність єдиної методики для обчислення якісних показників взаємодії між інструментом і ґрунтом на етапі проектування.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Теоретичні основи та математична модель обробітку ґрунту

Основною метою створення модернізованого робочого органу є підвищення показників продуктивності технологічного процесу. Щоб забезпечити успіх на етапі проектування, необхідно встановити критерії для оцінки цих показників. Це полегшить об'єктивне порівняння старих і нових структур. Враховуючи відсутність природного прототипу розробленого робочого органу, для обґрунтування конструктивних параметрів використовуються аналітичні методи. Цей процес базується на розрахунковій схемі та математичній моделі взаємодії з обробленим середовищем. Як правило, розрахункова схема розробляється творцем на основі аналізу вже існуючих конструкцій. Методичною основою адаптації розрахункової схеми до умов експлуатації є математична модель.

Основним аспектом математичної моделі є аналітичне визначення проектного опору тязі робочого органу, а також показників якості виконання технологічної операції. Цей аналіз базується на структурних параметрах інструменту та механіко-технологічних характеристиках середовища, що оброблюється. Математичні моделі, які зазвичай використовуються [5], побудовані з використанням конкретних робочих органів, і як такі не є універсальними. Отже, існує потреба в розробці математичної моделі, яка може бути використана для широкого кола робочих органів.

Наше аналітичне дослідження ґрунтується на теорії внутрішньої напруги, яку ми прийняли як нашу основу [6].

Сутність моделі можна сформулювати так: робочий орган функціонально розділений на ріжучий периметр і робочі поверхні. Краї ріжучого периметра згортають ґрунт, створюючи окрему від загального масиву призму осколків, які потім потрапляють на робочі поверхні. Потім робочими поверхнями ґрунт

подрібнюється та дробиться. Ці поверхні відчувають різні типи сил, включаючи тиск ґрунту, сили тертя та тиск на високій швидкості. У результаті загальний тяговий опір можна розбити на наступні компоненти, як зазначено в джерелі [7].

$$P = P_{СК} + (P_N + P_{ТР} + P_{ЗАТ} + P_V) \cdot \cos \left[ \arctg \frac{i \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} - \varphi \right], \quad (2.1)$$

Напрявлені проекції сил, що діють на відколювання призми, представлені через  $P_{СК}$ ,  $P_N$ ,  $P_{ТР}$ ,  $P_{ЗАТ}$  і  $P_V$ , які відповідно позначають сили відколювання, нормальний тиск ґрунту, силу тертя під час руху ґрунту, додаткову силу від затуплення леза та швидкісний компонент опору. Аналізуючи окремі компоненти, детально описані в [8], автором отримано уніфіковану інтегральну формулу (2.2), яка описує взаємодію робочого органу довільної геометричної форми з ґрунтом у сценарії блокового різання.

Згідно з раніше згаданими даними (2.2), очевидно, що існує суттєва кореляція між двома досліджуваними змінними.

$$\begin{aligned} P_{p1} = & \left[ C_{nz} \left[ \frac{0,66a^2 \cdot ctg \varphi_2}{\cos(\alpha_p - \varphi_2)} + \epsilon_3 \cdot a \right] \cdot tg(\alpha_p + \varphi_2) + 4,9\epsilon_3 \cdot a^2 \times \right. \\ & \times tg^2(45^\circ - 0,5\varphi_2) \cdot \gamma \left[ \sin \varphi_2 + \cos(\alpha_p + \varphi_2) \cdot \cos \alpha_p \cdot tg \varphi_1 \right] + \\ & + 2a^2 \{ 0,5C_{nz} [tg(45^\circ + \varphi_2) + ctg \alpha_p] \cdot \left[ \frac{0,55ctg \varphi_2}{\cos(45^\circ + \varphi_2)} \right] + \\ & + 4,9\delta_p \cdot tg^2(45^\circ - 0,5\varphi_2) \sin \varphi_2 \gamma \} \cdot tg \varphi_1 + K'(Z + X \cdot tg \varphi_1) \times \\ & \left. \times \epsilon_3 + \frac{9,81\epsilon_3 \cdot a \cdot \gamma}{g} \cdot \frac{\sin \alpha_p \cdot \cos \theta}{\sin(\alpha_p + \theta)} \cdot V^2 \right] \cdot \cos \left[ \arctg \left( \frac{i + \sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} \right) \right], \quad (2.2) \end{aligned}$$

Як можна помітити, тут описано різні параметри, які є невід'ємною частиною визначення горизонтальної складової опору ґрунту ( $P_{P1}$ ). Ці параметри включають зменшену глибину робочого ходу ( $a$ ), задану ширину периметра різання ( $b_3$ ) і параметри затуплення леза ( $Z$  і  $X$ ). Крім того, кут атаки ( $\alpha_p$ ) і кут

зовнішнього тертя ґрунту об сталь ( $\phi_1$ ) також є вирішальними факторами при визначенні  $R_{p1}$ .

У механіці ґрунту різні параметри використовуються для загального уявлення про поведінку ґрунту. Одним із таких параметрів є  $\phi_2$ , який відноситься до кута внутрішнього тертя ґрунту. Крім того, питома вага ґрунту, позначена  $\gamma$ , є ще одним важливим фактором, який відіграє роль у поведінці ґрунту. Специфічне зчеплення частинок ґрунту, представлене  $S_{pz}$ , також є вирішальним компонентом у цьому контексті. Нарешті, коефіцієнт ковзання,  $i$ , є коефіцієнтом, який використовується для опису ковзання частинок ґрунту.

Унікальний аспект цієї техніки полягає в тому, що вона використовує попередньо визначені значення ширини захоплення та робочої глибини ходу. Хоча цей підхід спрощує модель, він також призводить до еквівалентного опору тязі для робочих інструментів того самого типу, але різної конструкції, за умови, що ширина хвата зменшена. Така характеристика створює труднощі при використанні цієї методології для порівняння продуктивності інструменту. Крім того, рівень узгодженості між аналітично визначеними результатами та результатами експерименту залежить від точності методів, які використовуються для визначення зазначених параметрів.

Техніка, описана в посиланні [9], забезпечує засіб приблизного визначення ступеня деградації ґрунту за допомогою використання унікальної метрики – ступеня осипання. Цей показник визначається за такою формулою:

$$i_1 = \frac{2K_p \cdot E_v}{G^2} + 1. \quad (2.3)$$

де  $K_p$  – питомий тяговий опір знаряддя;

$E_v$  – модуль пружності;

$G$  – внутрішня напруга.

Ступінь подрібнення визначається так:



На основі розробленої методики розрахунку було реалізовано наступний підхід.

$$R = AE + EC = a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_2) + \frac{a}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (2.5)$$

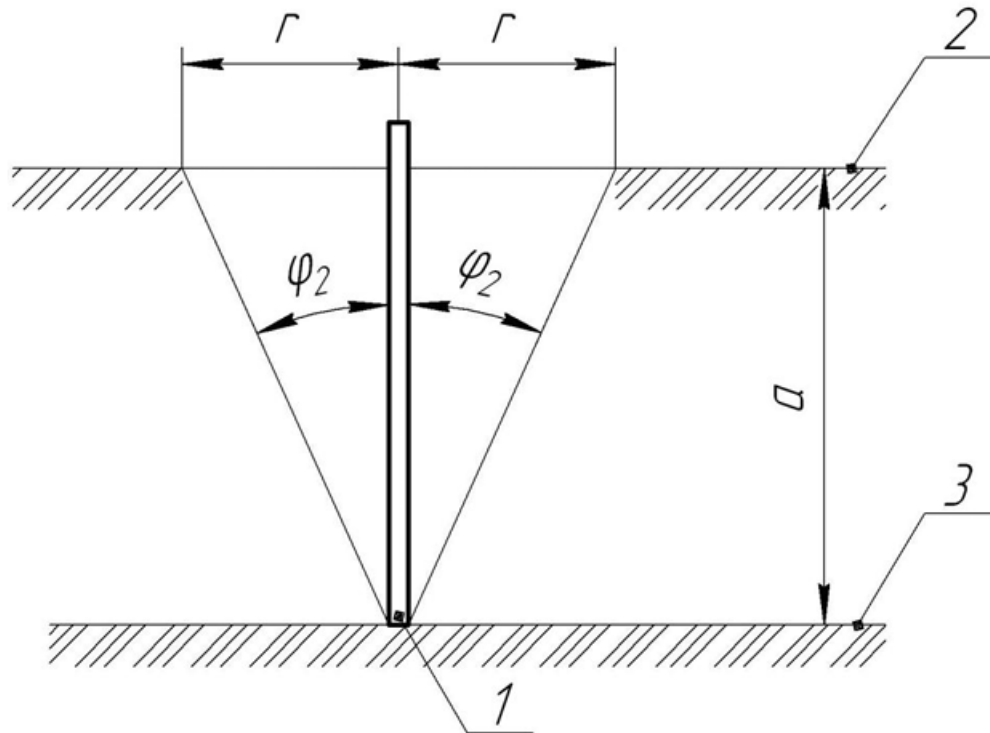


Рисунок 2.2 – Схема розрахунку для визначення меншої напівосі

Методологію розрахунку, використану в цьому дослідженні, можна підсумувати таким чином.

$$r = a \cdot \operatorname{tg}\varphi_2, \quad (2.6)$$

Визначення об'єму конуса:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r \cdot R \cdot a \quad (2.7)$$

Об'єм еліптичного конуса (2.7) відповідає об'єму зменшеного циліндричного конуса.

$$\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r \cdot R \cdot a = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R_{\text{ПР}}^2 \cdot a \quad (2.8)$$

Зменшений радіус конуса, позначений як  $R_{\text{ПР}}$ , відноситься до конуса, об'єм якого еквівалентний об'єму сколеної призми.

$$R_{\text{ПР}} = \sqrt{r \cdot R}$$

З геометрії відомо, що площа поверхні зрізаного конуса дорівнює площі поверхні, отриманої в результаті сколу призми. Коефіцієнт пропорційності в цьому випадку дорівнює 0,5, так як в утворенні тріщини бере участь тільки фронтальна частина зрізаного конуса.

$$S = 0,5 \cdot \pi \cdot R_{\text{ПР}} \cdot \sqrt{a^2 + rR} \quad (2.9)$$

За допомогою цієї методики досягається вирівнювання сили розколювання ґрунту.

$$P_{\text{СК}} = C_{\text{ПІТ}} \cdot S, \quad (2.10)$$

Як загальновизнано, поширення тріщини через ґрунт відбувається зі швидкістю, еквівалентною швидкості звуку в навколишньому середовищі. Ця швидкість набагато більша, ніж робочий хід агрегату, тому необхідно моделювати процес у квазістатичному режимі. З цією метою ми приймаємо такі припущення:

$$K_P = \frac{P_{\text{СК}}}{a \cdot b},$$

Для ілюстрації обчислимо ступінь деформації для конкретної альтернативи, яка була реалізована під час експериментального дослідження.

Інформація, яка утворюється в результаті виконання комп'ютерної програми, називається вихідними даними. Ця інформація може бути в різних формах, включаючи текст, зображення, відео чи аудіо. Важливо відзначити, що вихідні дані мають значення лише в контексті вихідного потоку конкретної програми, який є послідовністю інформації, яку програма генерує під час виконання. Таким чином, точне та точне представлення вихідних даних є незамінним для правильної та повної інтерпретації результатів.

Глибина робочого ходу позначається літерою «b» і має вимірюване значення 0,32 метра.

Ширина біта, позначена буквою «a» в даному контексті, вимірюється 0,1 метра.

Кут атаки, позначений символом  $\alpha$ , був кількісно визначений як 15 градусів.

Вимірювання кута внутрішнього тертя ґрунту, позначеного як  $\varphi_2$ , визначено рівним 55 градусам.

Зчеплення частинок ґрунту з даною поверхнею є важливим фактором у механіці ґрунту. У цьому контексті специфічна адгезія частинок ґрунту, яка позначається як  $S_{\text{ПМТ}}$ , відіграє вирішальну роль у визначенні міцності ґрунтових структур. Зі значенням 1,8 кН/м<sup>2</sup> питома адгезія частинок ґрунту набуває значення в контексті механіки ґрунту та її практичного застосування.

Параметри, призми сколу:

$$r = 0,4 \cdot \operatorname{tg} 55 = 0,0,568$$

$$R = 0,4 \cdot \operatorname{tg}(15+55) + 0,4/\operatorname{tg} 15 = 1,096 + 1,48 = 2,58$$

$$R_{\text{ПР}} = 1,21 \text{ м.}$$

Площа поверхні сколу:

$$S = 2,41 \text{ м}^2$$

Сила сколу:  $P_{\text{СК}} = 1,8 \cdot 2,41 = 4,34 \text{ кН}$

Питомий тяговий опір:  $K_{\text{Р}} = \frac{4,34}{0,4 \cdot 0,05} = 217 \text{ кН/м}^2$

Ступінь подрібнення:  $i = \frac{2 \cdot 217 \cdot 24 \cdot 1000}{638 \cdot 638} = 26,6$

Усереднений діаметр грудок можна знайти за формулою:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 0,304 \pi}{26,6}} = 0,21 \text{ м.}$$

### 2.3 Дослідження фінального етапу кришення

Початкова фаза процесу дроблення, як обговорювалося раніше, відрізняється певним і обчислюваним характером задіяних сил. Величина і напрямок цих сил можуть бути точно встановлені, що дозволяє досить точно оцінити нерівності ґрунту, утворені на цій стадії. Однак у міру просування процесу все більш очевидною стає його імовірнісний характер. Розподіл сил стає все більш хаотичним, що призводить до відповідного зростання складності колапсу. Для оцінки параметрів якості колапсу ми будемо використовувати або метод Монте-Карло, або імовірнісне моделювання з використанням генераторів випадкових чисел.

Застосовуючи техніку періодичного повторення та подальшого усереднення зібраних даних, можна отримати більш точний і уточнений кінцевий результат.

У розділі №3 результати обчислень щодо кількох моделей генерації випадкових чисел порівнюються з результатами емпіричних даних.

Діаметри контрольних грудок відповідають діаметрам отворів сита, які використовувалися в експериментальних дослідженнях. Крім того, зрушення в бік масових характеристик тісно пов'язане з методологією, яка використовується в тих самих експериментальних дослідженнях.

У цьому розділі розглядаються дві різні математичні моделі, які можна використовувати для визначення тягового опору інструменту: модель, розроблена дослідниками [11] та розроблену нами модель. Відмінним фактором між двома моделями є методологія, яка використовується для визначення компонента тягового опору, який призводить до створення призми відколу. Решта компонентів, включаючи тертя, тиск на високій швидкості, сили тиску та реакцію на затуплення леза, залишаються незмінними в обох моделях. Щоб забезпечити повне порівняння, ми провели розрахунки для кожного з цих

компонентів і порівняли результати з результатами, отриманими в результаті експериментальних досліджень (як показано в таблиці 2.1).

Таблиця 2.1 – Поетапна структура моделювання складу грудок розпушеного ґрунту

Етап №	Зміст етапу
1	Присвоєння початкових значень індексів $k=n=j=m=p=r=s=q=t=0$
2	Розрахунок об'єму сколотої призми
3	Розрахунок прогнозованого тягового опору
4	Визначення внутрішньої напруги $G$
5	Прогнозована ступінь кришення призми
6	Прогнозований об'єм грудок першого етапу кришення $U_1$
7	Генерація випадкового числа у відповідності до заданого розподілу $F(t)$ <a href="http://megagenerator.ru/numbers/">http://megagenerator.ru/numbers/</a>
8	Прогнозований об'єм окремо взятої грудки, $V_1$

8	Класифікатор ґрунтових відмінностей if $V_j \leq 0,525$ then $k = k+1; t = t+1$ if $V_j \leq 4,2$ then $n = n+1; t = t+1$  if $V_j \leq 8,2$ then $m = m+1; t = t+1$  if $V_j \leq 14,1$ then $p = p+1; t = t+1$  if $V_j \leq 22,4$ then $r = r+1; t = t+1$  if $V_j \leq 65,4$ then $s = s+1; t = t+1$  if $V_j \leq 220,8$ then $q = q+1; t = t+1$ if $t \leq 1000$ then goto №7
9	Коефіцієнт структурності $K = \frac{k}{m+n+p+r+s+q}$
10	end

Завдяки проведеним дослідженням була представлена комплексна методологія для оцінки показників якості, що стосуються елементарних різців. Периметр різання та робочі поверхні, які можна розглядати як сукупність незліченних елементарних ріжучих частинок, є встановленими знаннями [12].

#### 2.4 Дослідження оптимальних конструктивних параметрів долота

Запропонований нами метод оцінки дроблення передбачає розгляд долота виключно як ріжучої кромки. Проте в [13] долото аналізується з точки зору його ширини та довжини. Розглянувши таким чином залежність (2.2), можна визначити оптимальне співвідношення цих розмірів. Щоб дослідити залежність min-max з математичної точки зору, ми повинні представити довжину як функцію ширини захоплення, використовуючи класичну схему  $b_3 = k \cdot a$ , де  $k$  є постійним

коефіцієнтом. Потім ми беремо першу похідну функції по  $a$  і вивчаємо її поведінку в критичних точках. На жаль, цей підхід дає лише мінімальні та максимальні значення, що не гарантує оптимізації проміжних значень.

Наш унікальний підхід для визначення значення  $k$  передбачає розгляд рівняння (2.2) як рівняння регресії та використання стандартного калькулятора.

Після отримання даних наша мета — визначити канонічну форму рівняння та створити відповідну поверхню відгуку. Аналізуючи канонічне рівняння, можна отримати значення коефіцієнта, а зовнішній вигляд поверхні відгуку свідчатиме про адекватність рівняння (2.2). Далі ми перейдемо до кодування факторів, як представлено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Рівні варіювання факторів

Фактор	Код	Рівні факторів		
		-1	0	+1
Ширина долота, $a$ , мм	$X_1$	50	60	70
Довжина долота $b$ , мм	$X_2$	50	100	150
Кут атаки, $\alpha$ , град	$X_3$	15	20	25

Канонічне рівняння було отримано після ретельного аналізу та обчислення відповідних даних. Результати цих розрахунків були використані для отримання рівняння:

$$3,25 \cdot X_1 + 0,36 \cdot X_2 + 0,5X_3 - 0,5 \cdot (X+Y+z)^{0,5} + 1,8 = 0 \quad (2.11)$$

Після перегляду рівняння та основної сіткової структури поверхні відгуку стає очевидним, що існує значна кількість прийнятних значень як для ширини захоплення, так і для довжини біта. Досліджуючи співвідношення ширини та довжини секторів, як показано на малюнку 2.4, можна констатувати раціональне співвідношення для досліджуваних параметрів зі значенням  $k=3,6$ . Враховуючи

це, вибір ширини долота  $a=50$  мм, який узгоджується з прийнятим прототипом, дає довжину долота  $b=180$  мм.

Існуючі моделі взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем на сьогоднішній день мають істотний недолік. Ці моделі обмежуються аналітичним визначенням величини тягового опору. Проте наразі не існує способу аналітичного визначення якісних показників розсіпання ґрунту. Хоча в [14] було зроблено спробу оцінити процес дроблення, запропонований коефіцієнт характеризує лише початкову стадію процесу, а саме формування та відрив призми стружки.

Було впроваджено наш унікальний підхід для оцінки тягового опору, і згодом ми розробили метод прогнозування кінцевого фракційного складу. Для вивчення тонкощів процесу дроблення було створено комп'ютерний алгоритм моделювання. Отримані результати, включаючи розрахований фракційний склад і коефіцієнт структурності, зроблені для характерних ґрунтових умов Дніпропетровської області.

У цьому розділі проводиться порівняння методу, що зараз розробляється, та методу, описаного в посиланні [14]. Стверджується, що використання наданих початкових значень даних у моделі вносить заслугу на увагу ступінь неточності в обчисленні результату, що робить неможливим врахування унікальних конструктивних атрибутів даного інструменту.

Запропонована модель може похвалитися декількома перевагами, насамперед у своїй здатності забезпечити вичерпний опис процедур, пов'язаних із створенням сколеної призми та її подальшим уточненням. Крім того, розроблений алгоритм розрахунку фракційного складу розпушеного ґрунту можна легко виконати на персональному комп'ютері за допомогою таблиць excel.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Конструкція дослідницької установки

Експериментальне дослідження служить для підтвердження точності розробленої математичної моделі. У цьому випадку модель з'ясовує взаємодію між ґрунтом і долотом за допомогою спрощеної конструкції. Щоб оцінити цю модель, було проведено експеримент із використанням спеціальної конструкції, яка дозволяла спостерігати за поведінкою експериментального долота, так і продуктивність зубила, прототип показано на малюнку 3.1.



Рисунок 3.1 – Прототип конструкції

Після вилучення зі стояка зубило трансформується і закріплюється в прямокутну пластину, як показано на малюнку 3.2.



Рисунок 3.2- Загальний вигляд дослідного зразка глибокорозпушувача

Оцінку тягового опору проводили за допомогою тензодатчика УкрЦВТ, як показано на рисунку 3.3.

### 3.2 Програма досліджень

Основною метою експериментальних досліджень є підтвердження достатності сформульованої математичної моделі та здійсненості запропонованої схеми глибокорозпушувача. У результаті програму було налаштовано відповідно до цієї мети.

Згідно з математичною моделлю, використовуються наступні вихідні дані:

Особливе зв'язування частинок, ступінь міцності та поріг несучої здатності, а також нахили як внутрішнього, так і зовнішнього опору, а також точна величина щільності ґрунту — усі ці фактори є вирішальними елементами нашого аналізу.

Таким чином, програма забезпечує свої переваги поступово, забезпечуючи поетапний підхід до запланованих результатів.

Перед проведенням польових дослідів необхідно визначити механічні та технологічні властивості ґрунту за встановленою методикою [15].

Оцінку тягового опору дослідної установки проводили за допомогою тензометричного візка виробництва ДП «Гуляпільський механічний завод» спільно з ПАТ «Мотор-Січ».

Для оцінки ефективності прототипу глибокорозпушувача було проведено дослідження щодо аналізу якості розпушування ґрунту вздовж колії агрегату. Основні цілі цього дослідження включали визначення:

Коефіцієнт структурності є важливим показником, який використовується для оцінки стабільності та довговічності даної конструкції. Це числове значення, яке виражає ступінь, до якого конструкція та композиція конструкції підходять для протистояння навантаженню та зовнішнім силам. Цей коефіцієнт визначається з урахуванням багатьох факторів, включаючи використані матеріали, форму та розміри конструкції та очікувану несучу здатність. По суті, коефіцієнт структурності служить надійним показником загальної міцності та пружності конструкції.

У ґрунтознавстві існує добре встановлений принцип, відомий як закон розподілу сформованих ґрунтових відмінностей. Цей закон стосується природної варіації характеристик ґрунту в даній географічній зоні, і він передбачає, що властивості ґрунту мають тенденцію демонструвати певний ступінь просторової автокореляції. Тобто типи ґрунтів, які розташовані поруч один з одним, мають більшу ймовірність мати подібні властивості, ніж ті, які знаходяться далеко один від одного. Цей принцип має важливе значення для різних галузей, включаючи сільське господарство, екологію та геологію, і він широко визнаний наріжним каменем сучасного ґрунтознавства.

Рельєф поверхні характеризується наявністю хребтів.

### **3.3 Обґрунтування власної методики досліджень**

У механіці ґрунту сила зчеплення між частинками, також відома як питома адгезія частинок ґрунту ( $C_{\text{пит}}$ ), служить основним показником механічних властивостей ґрунту. Кількісне визначення цієї сили було досягнуто за допомогою динамічного вимірювача твердості ДорНДІ, як показано на малюнку 3.3.

Принцип визначення можна описати наступним чином: на поверхню ґрунту впливають циліндричним наконечником твердоміра, який має площу поперечного перерізу  $2 \text{ см}^2$  і довжину 100 мм. Використовується вантаж масою 2,5 кг, який піднімають на висоту 0,4 м, а потім відпускають. При контакті з упором кінчик піддається 1 кґм енергії. Цей процес повторюється до повного занурення кінчика в ґрунт. Підраховують кількість ударів і визначають величину питомої адгезії частинок за довідковими даними [16].

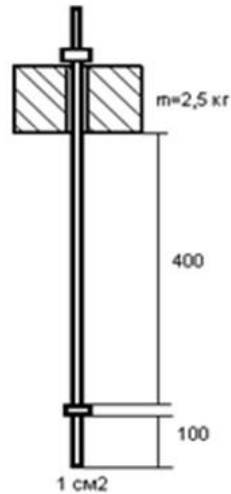


Рисунок 3.3 – Конструктивна схема твердоміру ДорНДІ [17].

Процес вимірювання тягового опору включає механічний візок, що складається з основної рами (як показано на малюнку 3.4). У внутрішньому просторі цієї основної рами встановлена рухома рама з можливістю поздовжнього переміщення, позначена як рама 3. Додатково у внутрішньому просторі рами 3 встановлена рухома рама з можливістю поперечного переміщення, позначена як рама 4. На рамі 4 закріплена пластина, на якій підвішується прототип робочого органу. Обидві рухомі рами підтримуються роликами, позначеними як 10, що забезпечує відносне переміщення між ними та відносно основної рами. Отже, сили, що діють на робочий орган, сприймаються обома рамами, що дозволяє виміряти ці сили. Однак недоліком оригінальної моделі є те, що вимірювання діючих сил проводилося динамометрами, що робить майже неможливим отримання точних значень при роботі в динамічному режимі. Для визначення величини тягового опору необхідно було розрахувати діапазон діючих зусиль. У рамках процесу модернізації датчики сили КМ1502/КТ150 були впроваджені для заміни динамометрів, які використовувалися раніше, як показано на малюнку 3.5.

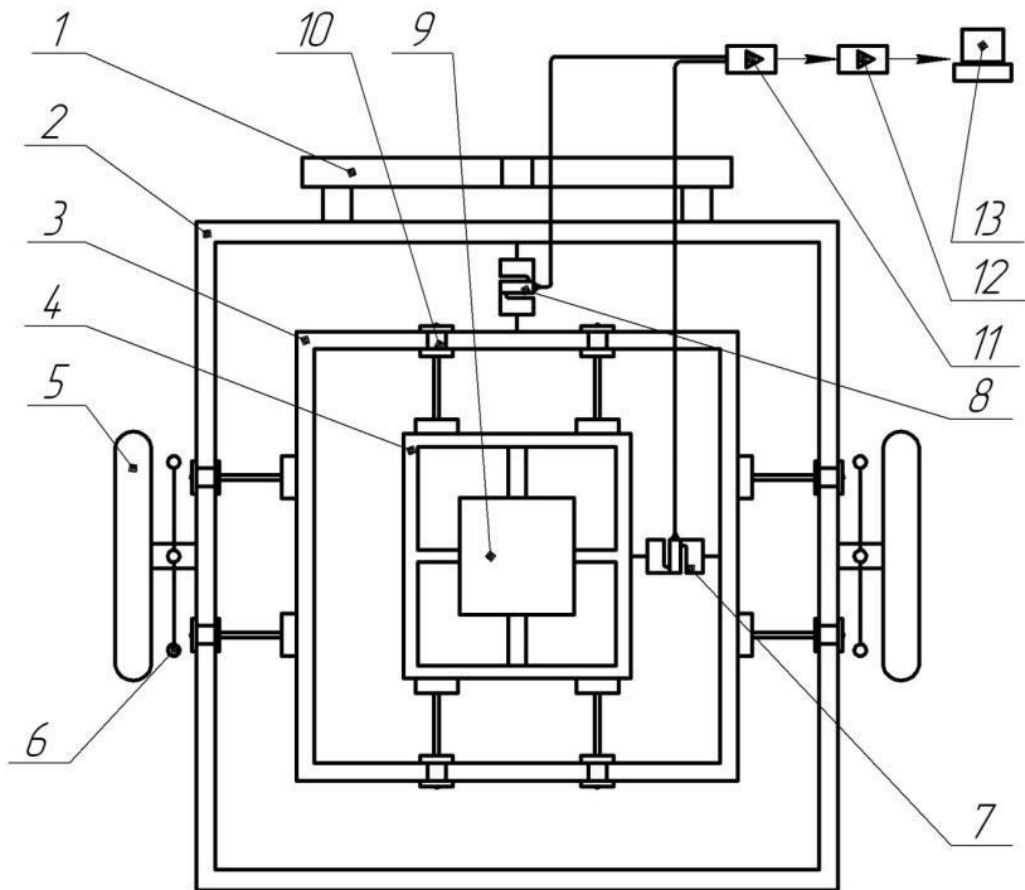


Рисунок 3.4 – Конструктивна схема тензOMETричного візка



Рисунок 3.5 - Датчик сили КМ 1502 / КТ 150

Датчики мають здатність виявляти та інтерпретувати сили, які зараз діють, і згодом вони перетворюють ці сили в електричний сигнал. Потім цей сигнал передається на первинний блок 11 обробки для подальшого аналізу та обробки.

Блок 11, відповідає за фільтрацію будь-якого випадкового збудження, яке триває менше 0,1 секунди. Відфільтрований сигнал потім перетворюється в цифровий і передається на персональний комп'ютер. На комп'ютері за

стандартним алгоритмом розраховується абсолютне значення тягового опору. Щоб визначити масу тари візка, відоме навантаження було прикладено до рухомого візка, дотримуючись звичайної процедури перевірки.

Швидкість поступового руху заповнювача встановлювалася шляхом вимірювання часу, необхідного для проходження заповнювачем заданих контрольних ділянок. Для цього було розмежовано лінію проходу, використано дерев'яні стовпи для позначення контрольних ділянок довжиною 10 метрів. За допомогою секундоміра фіксували час проходження агрегатом контрольних ділянок по осі заднього моста трактора. Потім на основі отриманих результатів було визначено фактичну робочу швидкість.

Для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунту використано закон Кулона.

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2), \quad (3.1)$$

Щоб визначити значення  $c$  і  $\varphi_2$  у рівнянні (3.1), необхідно провести два окремих експерименти зсуву. Оскільки в рівнянні є два невідомих, потрібні два експерименти. Для проведення експериментів необхідно використовувати різні значення  $\sigma$  під час вимірювання  $\tau$  (де  $\tau = T/F$  і  $\sigma = P/F$ , де  $F$  є площею поперечного перерізу зразка).

На відміну від сили тертя, сила зчеплення не залежить від нормального тиску. Отже, ми отримуємо пару рівнянь, які містять два невідомих.

$$\tau_1 = c + \sigma_1 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2); \quad (3.2)$$

$$\tau_2 = c + \sigma_2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2). \quad (3.3)$$

При успішному розв'язанні системи рівнянь отримують числове значення коефіцієнта внутрішнього тертя.

$$f_2 = \operatorname{tg}(\varphi_2) = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\sigma_2 - \sigma_1}. \quad (3.4)$$

Більшість методів, що використовуються для підрахунку рослин, вимагають визначення кількості рослин на одиницю площі. Це досягається шляхом розміщення рамки на зовнішній частині поля та підрахунку кількості рослин, охоплених її межами. Однак ця методика трудомістка і займає багато часу.

У рамках нашого дослідження рамку розміром 25x25 см було акуратно встановлено на поверхні поля. Мета полягала в тому, щоб витягти верхній шар ґрунту, який простягався на глибину 5-8 см. Шар ретельно просівали на ситі діаметром 10 мм. Згодом ми викинули грудочки, які залишилися в коробці сита, а рослинні залишки скрупульозно зібрали, зважили та підрахували. Отримані дані охоплювали не лише кількість і довжину залишків рослин, але й їх відповідну вагу.

Для оцінки ступеня розпушення ґрунту переважно використовується структурний фактор  $K_{ST}$ . Цей коефіцієнт характеризується як відношення кількості агрономічно значущих заповнювачів розміром від 0,25 до 10 мм до кількості заповнювачів діаметром менше 0,25 мм і розміром грудок більше 10 мм.

Для цієї мети використовується визначення класифікатора сітки. Для розрахунку  $K_{ST}$  необов'язково знати всю номенклатуру заповнювачів, так як достатньо маси фракцій, що мають діаметр менше 10 мм і більше 10 мм. Для цього ґрунт у неущільненому стані був викопаний із визначеної ділянки та осаджений на сито з отвором діаметром 10 мм, де його згодом просіяли (див. рис. 3.10). Залишки будь-якої існуючої рослинності також були вилучені із зразка.

На основі емпіричних даних було продемонстровано, що ізоляція агрегатів розміром менше 0,25 мм призводить до похибки не більше 2...3%. Ця похибка вважається нижчою за точність самого експерименту. Тому вважається прийнятним використовувати цей метод із задовільним рівнем точності.

$$K_{ST} = \frac{A}{B-A}. \quad (3.5)$$

A – маса агрегатів, відсіяних решетом 10 мм;

B – загальна маса взятої проби.

Більшість методів, використаних у цьому дослідженні, ґрунтуються на відомих джерелах і були адаптовані відповідно до вимог нашого конкретного дослідження. Ці методи вільні від будь-яких підозр щодо їх дійсності.

Під час вимірювання тягового опору значно в нагоді стає адаптований тензодатчик. Це пов'язано з властивим обмеженням неможливості виконання прямих вимірювань на розробленому пристрої.

Реалізація запропонованого методу оцінки якості розпушування ґрунту за структурними коефіцієнтами дає змогу об'єктивно порівнювати ефективність ґрунтообробних машин різної конструкції. Результати досліджень, проведених в умовах чорнозему, показують, що неврахування частинок діаметром менше 0,25 мм призводить лише до похибки менше 1,0%, що значно менше, ніж точність експериментального процесу.

Наша команда розробила новий підхід до оцінки існування рослинних залишків за принципом ваги. Вважаємо, що цей метод забезпечує більш об'єктивну характеристику показника. Крім того, сумнівна можливість точно визначити кількість рослинності в межах відмежованих територій. Такого визначення все ще можна досягти навіть після процесу перевірки. Запропонований метод має додаткову перевагу, оскільки дозволяє дослідникам вимірювати довжину окремих рослин і генерувати показники розподілу за допомогою статистичного аналізу.

### **3.4 Результати досліджень та експериментів**

Площа насаджень 380 га.

Тип ґрунту - чорнозем звичайний середньосуглинистий

Стан поверхні – рел'єф – рівний

мікрорел'єф - рівний

Агрофон - різнотрав'я

Уклон поверхні – до 3 градусів

Було проведено дослідження для перевірки достатності математичної моделі.

Таблиця 3.1 - Ключові механічні та технологічні властивості ґрунту після трьохкратного проходження

№	Показник	Значення
1	Питоме зчеплення часток ґрунту, $C, \text{кН/м}^2$	1,86
2	Межа несучої спроможності, $K'$	464
3	Питома вага, $\gamma, \text{т/м}^3$	1,46
4	Кут тертя в консолідованому стані, град	52
5	Кут тертя по сталі, град	36
6	Твердість, $q, \text{Н/см}^2$	5,54

Первинна інформація стосується емпіричних даних, які були отримані в ході дослідження на місці експерименту (див. Таблицю 3.1). Результати обчислень були представлені у вигляді таблиць (таблиці 3.2 - 3.4).

Таблиця 3.2 - Розподіл фракційного складу

Закон розподілу випадкових чисел - рівномірний			
Об'єм одиничної грудки, $\text{см}^3$	Приведений діаметр грудки, $\text{см}$	Кількість відмінностей у фракції	Загальна маса фракції $\text{г}$
0,525	1,0	1201	751
4,2	2,0	1226	5149
8,2	2,5	977	1378
14,1	3,0	869	19466
22,4	3,5	110	7194
65,4	5,0	-	-
220,8	7,5	-	-
Всього			339940

Структурний коефіцієнт  $K_{\text{СТ}}$ :  $K_{\text{СТ}} = (751+5149)/339940 = 0,017$

Таблиця 3.3 - Розподіл фракційного складу

Закон розподілу випадкових чисел - нормальний			
Об'єм одиничної грудки, см <sup>3</sup>	Приведений діаметр грудки, см	Кількість у фракції	Загальна маса фракції кг
0,525	1,0	251	132
4,2	2,0	424	1781
8,2	2,5	632	5182
14,1	3,0	450	6345
22,4	3,5	370	8288
65,4	5,0	26	1701
220,8	7,5	0	0
Всього			23329

Структурний коефіцієнт  $K_{СТ}$ :  $K_{СТ} = (132+1781)/23329 = 0,08$

Таблиця 3.4 - Розподіл фракційного складу

Закон розподілу випадкових чисел - експоненціальний			
Об'єм одиничної грудки, см <sup>3</sup>	Приведений діаметр грудки, см	Кількість у фракції	Загальна маса фракції кг
0,525	1,0	3251	1857
4,2	2,0	613	3758
8,2	2,5	406	4788
14,1	3,0	253	5212
22,4	3,5	109	3564
65,4	5,0	40	3803
220,8	7,5	7	2254
			25236

Структурний коефіцієнт  $K_{СТ}$ :  $K_{СТ} = (1857+3758)/25236 = 0,22$

Таблиця 3.5 - Розподіл фракційного складу в результаті проведених досліджень

Діаметр отвору решета, см	Маса фракції, кг	Процентний вміст
1,0	1,43	6,0
2,0	3,76	15,2
2,5	4,78	19,1
3,0	5,21	21,0
3,5	3,56	14,4
5,0	3,79	15,3
7,5	2,24	9,0
Всього	24,77	100

Структурний коефіцієнт  $K_{СТ}$ :  $K_{СТ} = (3,76+1,43)/24,77 = 0,21$

Найбільш точний спосіб опису розподілу фракційного складу за масою – це кубічна залежність.

$$Y = 0,11X^3 - 1,84X^2 + 9,14X - 9,16$$

Після вивчення зібраних даних рекомендується, щоб математична модель використовувала експоненціальний і рівномірний закони розподілу для генерування випадкових чисел. Використання нормального закону призводить до переоцінки дисперсії ґрунту при розгляді меншого зменшеного діаметра. Важливо, однак, зазначити, що дослідження проводилися на ґрунтах відносно легкого характеру (з питомим зчепленням частинок  $1,8 \text{ кН/м}^2$ ), що відповідає умовам експерименту. Для більш важких ґрунтів може знадобитися використання альтернативних законів розподілу.

Незалежно від підходу до моделювання кінцевий розподіл фракційного складу регулюється кубічною залежністю. Це явище можна пояснити тим фактом, що теоретичні дослідження проводяться щодо зміни об'єму ґрунту, який за своєю суттю є кубічним і залежить від діаметра зразка ґрунту.

Як задокументовано в літературі [18], відомо, що опір зчепленню має кілька аспектів, таких як сили фрагментації ґрунту та сили розриву, сили стиснення та адгезії. У нашому дослідженні внесено структурні зміни, зокрема аналітичну оптимізацію конструктивних параметрів долота, що впливає на складову сили сколювання ґрунтової призми та її початкове розпушення. Шляхом різноманітних експериментальних та аналітичних досліджень встановлено, що цей компонент відіграє вирішальну роль у продуктивності долото-розпушувача [19].

Проведення комплексного експерименту, який охоплює зміни як структурних параметрів, так і механічних властивостей ґрунту відповідно до вимог роботи, є недоцільним завданням. Таким чином, наше дослідження обмежалося порівнянням тягового опору дослідної та серійної машин за однакових умов експлуатації. Результати цього дослідження наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.6 – Результати оцінки тягового опору, отримані експериментально за робочої швидкості 7.36 км/год

Глибина робочого ходу, см	Тяговий опір, кН	
	Дослідний зразок	Серійний зразок
20	1,07	1,10
25	1,19	1,22
30	1,23	1,25
35	1,25	1,27

Аналізуючи залежності, представлені на малюнках 3.6 і 3.7, стає очевидним, що найбільш відповідним описом процесу є кубічна залежність.

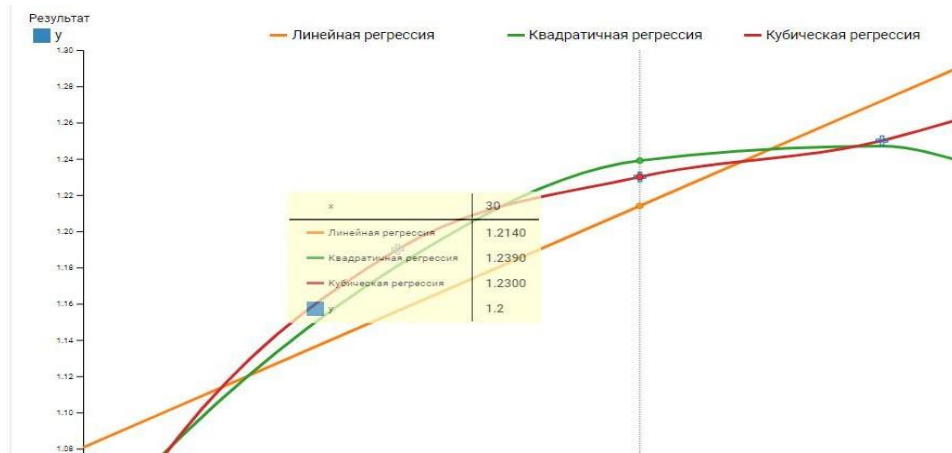


Рисунок 3.6 – Графік залежності тягового опору експериментального агрегату від глибини занурення за швидкості роботи 7.36 км/год

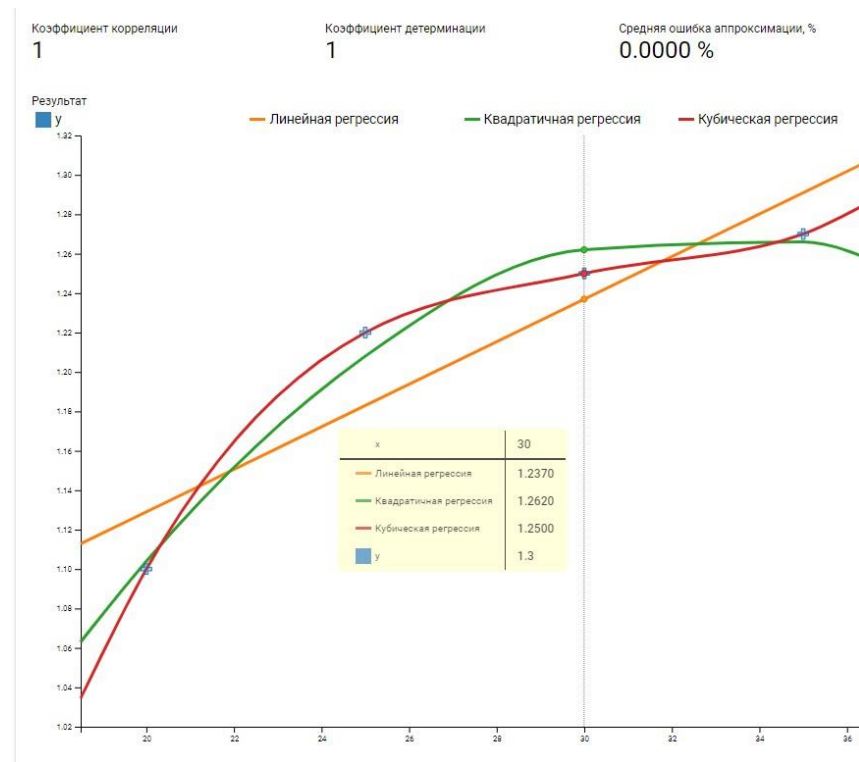


Рисунок 3.7 - Графік залежності тягового опору серійного агрегату від глибини занурення за швидкості роботи 7.36 км/год

Рівень продуктивності протягом години визначається за допомогою спеціального математичного рівняння:

$$W_{\text{год}} = 0,1 \cdot B_p \cdot V_p \cdot \tau,$$

де  $V_p=3,0$  м – робоча ширина захвату;

$V_p$  – швидкість поступового руху, км/год;

$\tau$  - коефіцієнт використання робочого часу зміни.

Для розрахунку коефіцієнта використання змінного робочого часу використовується наступна формула:

$$\tau = \frac{T_p}{T_{зм}}$$

де  $T_p$  – чистий робочий час зміни, годин;

$T_{зм}$  – час зміни, годин.

$T_x = 0,13$  години – час холостого ходу на переїздах;

$T_{пз} = 0,044$  години – підготовчо-заклучний час;

$T_{ТО} = 0,22$  години – час, що витрачається на технічне обслуговування;

$T_{ТУ} = 0,048$  години – час, що витрачається на зупинки по технічному нагляду;

$T_{см} = 0,2$  години – час, що витрачається на усунення технологічних відмов;

$T_{відп} = 0,30$  години - час відпочинку;

Враховуючи наведену інформацію, можна визначити, що загальна кількість робочих годин протягом зміни становить:

$$T_p = 7 - 0,13 - 0,044 - 0,22 - 0,048 - 0,2 - 0,30 = 6,31 \text{ годин}$$

Коефіцієнт використання робочого часу:

$$\tau = 6,31/7 = 0,9$$

Питання розумного використання робочого часу постійно є об'єктом підвищеної уваги як для координаторів виробництва, так і для операторів тракторів. Це пов'язано з тим, що він є основною основою для розрахунку винагороди.

Продуктивність протягом години:

$$W_{год} = 0,1 \cdot 3,0 \cdot 8,7 \cdot 0,9 = 2,08 \text{ га/год,}$$

Загальна продуктивність:

$$W_{\text{ЗМ}} = 2,08 \cdot 7 = 19,6 \text{ га/ЗМ}$$

Формула для розрахунку витрати паливно-мастильних матеріалів в цьому режимі виглядає наступним чином:

$$q = \frac{Q_P \cdot T_P + Q_X \cdot T_X + Q_O \cdot T_O}{0,1 \cdot B_P \cdot V_P \cdot T_P} \quad (3.8)$$

де  $q$  - питомі витрати паливно-мастильних матеріалів, кг/га;

$Q_P$  – часові витрати пального у робочому режимі, 31 кг/год;

$Q_X$  – часові витрати пального на холостих переїздах, 10 кг/год;

$Q_O$  – часові витрати пального на зупинках (при включеному двигуні), 2,3 кг/год;

$T_P$  - час роботи у номінальному режимі, годин;

$T_X$  – час на холості переїзди, годин;

$T_O$  – час роботи на зупинках, годин.

На підставі проведених раніше розрахунків:

$$a = \frac{31 \cdot 6,22 + 10 \cdot 0,12 + 2,3 \cdot 0,45}{0,1 \cdot 3,0 \cdot 8,7 \cdot 6,22} = 12,01 \text{ кг/га}$$

При розрахунку за встановленою формулою очікувані витрати палива  $q = 12,01$  кг/га.

Експериментальні дослідження значною мірою підтвердили придатність запропонованої математичної моделі для взаємодії робочого органу з ґрунтовим середовищем, а також доцільність обраного конструктивного рішення.

Під час моделювання процесу подрібнення встановлено, що фракційний склад грудок в обробленому шарі ґрунту можна використовувати як експоненціальну або лінійну залежність.

За результатами експерименту встановлено, що середній тяговий опір дослідного зразка інструменту на 10-12 % нижчий, ніж серійного зразка. Крім того, слід зазначити, що відношення довжини долота до ширини було визначено

рівним 3,6 завдяки широким польовим дослідженням і було підтверджено як вирішальний фактор, який слід враховувати.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Забезпечення безпечних умов праці є одним із ключових аспектів організації будь-якого виробничого процесу в сільському господарстві. Використання сільськогосподарської техніки, зокрема агрегатів для обробки ґрунту, пов'язане з низкою потенційних небезпек, які можуть становити загрозу для життя і здоров'я працівників. Особливої уваги потребує робота з чизелями-глибокорозпушувачами, оскільки такі машини відрізняються великими габаритами, значною масою, високою енергозатратністю процесів та складними умовами експлуатації. В умовах сучасного виробництва, де стоїть завдання підвищення продуктивності при зменшенні витрат, не можна нехтувати питаннями охорони праці, адже будь-яка аварійна ситуація або травматизм призводять не лише до матеріальних збитків, а й до серйозних соціальних наслідків.

Основними небезпеками під час роботи з агрегатами для глибокого розпушування є ризики механічного травмування, пов'язані з рухомими частинами машини. Робочі органи чизеля мають велику проникаючу здатність, і при недотриманні техніки безпеки можливе потрапляння працівника у зону дії робочих органів. Також небезпеку становить процес зчіплення агрегату з трактором, коли оператор або допоміжний персонал може опинитися в небезпечній зоні. Нерідко саме під час підготовки до роботи чи проведення ремонтних операцій відбувається найбільша кількість травм через відсутність контролю, поспіх або нехтування інструкціями.

Не менш важливим фактором є підвищене навантаження на оператора трактора, який здійснює керування агрегатом. Тривала робота в умовах вібрації, шуму, запиленості повітря та обмеженого простору кабіни може призводити до швидкої втоми, зниження концентрації уваги і, як наслідок, підвищення ймовірності аварійних ситуацій. Високий рівень шуму від двигуна і робочих

органів негативно впливає на слух, а постійні вібраційні навантаження — на опорно-руховий апарат і серцево-судинну систему. У разі нехтування нормами охорони праці тривале перебування в таких умовах може призвести до професійних захворювань.

Особливу небезпеку під час експлуатації чизеля-глибокородзпущувача становить робота на нерівних ділянках поля, де виникає ризик перекидання трактора або пошкодження ходових частин агрегату. Це особливо актуально для схилів, ярів чи полів з неоднорідною структурою ґрунту. При високій швидкості руху будь-яка перешкода може спричинити втрату керованості, що створює загрозу не лише для оператора, а й для інших працівників, які можуть перебувати поблизу.

Важливим чинником ризику є і підвищене пилоутворення, що виникає під час глибокого розпушування, особливо у суху пору року. Потрапляння пилу в органи дихання може викликати алергічні реакції, подразнення слизових оболонок і з часом сприяти розвитку хронічних захворювань. Крім того, пил обмежує видимість, що також може спричинити аварійні ситуації. З огляду на це оператори повинні користуватися засобами індивідуального захисту, а самі агрегати мають бути обладнані системами, які мінімізують пилоутворення.

Ще одним джерелом небезпеки є високий рівень фізичного та психоемоційного навантаження на працівників. Робота в полі, що супроводжується тривалим перебуванням на відкритому повітрі під дією сонячної радіації, вітру чи низьких температур, може спричиняти перегрівання або переохолодження організму. У поєднанні з монотонністю процесу це знижує увагу та швидкість реакції оператора. Нерідко такі фактори призводять до помилок у керуванні технікою, які можуть мати тяжкі наслідки.

З метою запобігання небезпечним ситуаціям необхідно дотримуватися комплексу заходів з охорони праці. У першу чергу оператори та допоміжний персонал повинні проходити систематичне навчання і перевірку знань з техніки

безпеки. Працівник має добре знати конструктивні особливості агрегату, порядок його експлуатації, вимоги до підготовки машини до роботи та правила її обслуговування. Важливим є дотримання регламенту технічних оглядів та своєчасне усунення несправностей, оскільки будь-який дефект може стати причиною аварії.

Захист від механічних ушкоджень забезпечується за рахунок обладнання агрегатів спеціальними огорожувальними пристроями, які унеможливають доступ до рухомих частин під час роботи. При проведенні ремонтних і налагоджувальних робіт необхідно повністю зупиняти двигун, відключати вал відбору потужності та встановлювати агрегат у стійке положення, використовуючи підпори та блокувальні пристрої. Забороняється перебування сторонніх осіб у зоні дії машини, особливо дітей, що нерідко трапляється в умовах сільської місцевості.

З метою зниження негативного впливу шуму та вібрації оператор повинен працювати у спеціальних захисних навушниках і дотримуватися встановлених режимів роботи, які передбачають чергування періодів праці та відпочинку. Кабіна трактора має бути обладнана сучасними системами амортизації та шумоізоляції, що значною мірою знижує рівень шкідливих факторів. Для захисту органів дихання у запилених умовах слід використовувати респіратори або маски, а для захисту очей — спеціальні захисні окуляри.

Щоб уникнути перегрівання або переохолодження організму, необхідно забезпечити операторів відповідним спецодягом, який відповідає сезону і погодним умовам. Важливим елементом є також організація режиму праці та відпочинку з урахуванням фізіологічних потреб людини. Раціональний розподіл робочого часу дозволяє уникнути перевтоми і підтримувати стабільну працездатність протягом усього робочого дня.

Окрему увагу слід приділяти пожежній безпеці, оскільки під час експлуатації сільськогосподарської техніки можливе загоряння через витік

пального, перегрівання деталей або потрапляння горючих матеріалів на розігріті поверхні. Кожен агрегат має бути оснащений вогнегасником, а працівники повинні знати правила його використання. У разі виникнення пожежі необхідно діяти швидко й організовано, щоб уникнути масштабних збитків.

Таким чином, охорона праці під час роботи з чизелями-глибокородпушувачами включає цілий комплекс заходів, спрямованих на попередження травматизму, професійних захворювань і аварійних ситуацій. Її ефективність залежить від дотримання технічних і організаційних вимог, правильного використання засобів індивідуального захисту, належної підготовки персоналу та суворого контролю за станом техніки. Тільки комплексний підхід до вирішення цього питання дозволить забезпечити не лише безпеку працівників, а й стабільність та ефективність усього виробничого процесу.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Економічні розрахунки та послідує порівняння показників будемо проводити з серійним агрегатом ГРН - 3.0.

Таблиця 5.1 представляє зведення первинних даних, використаних у процесі розрахунку.

Таблиця 5.1 - Вихідні дані для економічного розрахунку

№	Показник	Розмірність	Технологічна машина	
			Серійна	Модернізована
1	Річний обсяг гоботи	га	380	380
2	Продуктивність	га/год	1,8	2,08
3	Витрати ПММ	кг/га	14,5	12,01
4	Вартість:	грн		
	- Трактора		560000	560000
	- Машини		146000	146500
	- Всього		706000	706500
5	Кількість обслуговуючого персонала		1	1

Чисельне значення нормо-годин в обсязі робіт:

$$K_{\text{НГ}} = \frac{W_{\text{СЕЗ}}}{W_{\text{ГОД}}} = \frac{380}{2,08} = 182,69 \text{ год} \quad (5.1)$$

Витрати праці:

$$V_{\text{П}} = K_{\text{НГ}} \cdot n = 182,69 \cdot 1 = 182,69 \quad (5.2)$$

Операційні витрати (заробітна плата). Поняття винагороди в організаційному середовищі є багатогранним і складається з різних компонентів. Одним із таких компонентів є винагорода, яка надається працівнику у формі основної заробітної плати – фіксованої суми винагороди, яка виплачується на

регулярній основі, часто щомісяця або раз на два тижні. Крім основної заробітної плати, існують інші форми винагороди, на які працівник може мати право, наприклад, додаткова заробітна плата. Ця додаткова компенсація часто надається за роботу, що виходить за рамки звичайних обов'язків працівника, або за виняткову продуктивність. Разом із заробітною платою працівникам також можуть надаватися нарахування, які, по суті, є заробленими винагородами, які накопичуються з часом. Ці накопичення можуть включати оплачувану відпустку, наприклад відпустку та лікарняний, а також інші пільги, такі як медичне страхування та пенсійні плани.

$$\Pi = \frac{C_{\Gamma}}{W_{\text{год}}} \cdot K_1 \cdot K \quad (5.3)$$

$$\Pi = \frac{47,54}{2,08} \cdot 1,2 \cdot 1,375 = 37,71 \text{ грн/га}$$

Амортизація (ТЗ та агрегат по 15% - норма амортизації, норма виробітку:  
Трактор 1550 год, агрегат 580 год):

Трактор:

$$A_{\text{ТР}} = \frac{560000 \cdot 15}{100 \cdot 1550 \cdot 2,08} = 26,05$$

Агрегат:

$$A_{\text{М}} = \frac{146500 \cdot 15}{100 \cdot 580 \cdot 2,08} = 18,22$$

Всього:

$$A_{\Sigma} = 26,05 + 18,22 = 44,27 \text{ грн/га}$$

Втрати на ПММ:

$$B_{\text{ПММ}} = 55,5 \cdot 12,01 = 666 \text{ грн/га}$$

ТО та зберігання:

$$B = \frac{B_{\Sigma} \cdot (\alpha_{\text{ТО}} + \alpha_{\Sigma} + \alpha_{\text{ТР}})}{100 \cdot K_{\text{НГ}} \cdot W_{\text{год}}} \cdot K \quad (5.4)$$

$$B_{\text{ТР}} = \frac{560000 \cdot (11 + 8 + 0,2)}{100 \cdot 182,69 \cdot 2,08} = 282,95 \text{ грн/га}$$

Експлуатаційні витрати, га:

$$E_B = 37,71 + 44,27 + 414,35 + 282,95 = 779,28$$

Експлуатаційні витрати, всього:

$$E_{\Sigma} = 779,28 \cdot 380 = 296126,40 \text{ грн}$$

Річний економічний ефект:

$$E_E = 439489 - 402100,80 = 37388,20 \text{ грн}$$

Термін окупності:

$$T_o = 706500 - 706000 / 37388,2 = 0,1 \text{ роки}$$

Результати цього дослідження задокументовано в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати оцінки економічної ефективності агрегату

№	ПОКАЗНИКИ	Варіант	
		Базовий	Проект
1	Вид роботи	Обробіток ґрунту	
2	Об'єм роботи, га	380	380
3	Склад агрегата:	Т-150К	Т-150К
	Трактор		
	Машина	ГРН-3,0	ГРН-3,0М
4	Продуктивність, га/год	1,8	2,08
5	Кількість нормо-годин у обсязі робіт	211,11	182,69
6	Кількість обслуговуючого персоналу -трактористів-машиністів -допоміжних працівників	1 -	1 -
7	Тарифна ставка, грн/год	47,54	47,54
8	Норма витрати пального, кг/га	14,5,	12,01
9	Балансова вартість, грн:		
	- трактора	560000	560000
	- машини	146000	146500
10	Комплексна ціна ПММ, грн/кг	34,5	34,5
11	Експлуатаційні витрати, грн/га у тому числі:	877,87	779,28
	Амортизаційні відрахування:		
	-трактор	30,11	26,05
	-машини	20,98	18,22
	-всього	51,09	44,27
	. Витрати на ПММ	500,25	414,35
	.Витрати на ТО, ТР, зберігання,		
	-трактора	282,95	282,95
	-машина	73,77	74,02
	-всього	356,72	356,97

12	Капітальні вкладення, грн/га	1857,89	1859,21
13	Приведені затрати, грн/га	1156,55	1058,16
14	Річний економічний ефект, грн		37388,20
14	Термін окупності, років		0,1

На основі розрахункового аналізу встановлено, що річний фінансовий ефект становить 37388,20 грн з урахуванням сезонного навантаження 380 га. Крім того, період часу, необхідний для окупності інвестицій, оцінюється в 0,1 року.

## ВИСНОВКИ

Після проведення ретельного аналізу наявної літератури та рекламних матеріалів виробників було встановлено, що комбінований одностійний глибокорозпушувач демонструє потенціал для майбутнього використання. Варто зазначити, що одноступінчасті розпушувачі класичної схеми використовуються переважно для меліорації або рекультивації штучно порушених ґрунтів. І навпаки, двоступінчасті глибокорозпушувачі більш складні в експлуатації та схильні до технологічних збоїв. Завдяки цим факторам їх переважно використовують як знаряддя для викопування коренеплодів та цибулевих культур.

Минулі дослідження значною мірою спираються на експериментальні дані, з невеликим акцентом на аналітичних підходах. Сучасні моделі взаємодії робочого органу з ґрунтом, на жаль, обмежуються аналітичною оцінкою тягового опору. На жаль, не існує аналітичного методу для визначення якісних показників фрагментації ґрунту. Хоча [20] представив коефіцієнт дроблення для оцінки початкової стадії утворення та відділення призми стружки, цей підхід не враховує весь процес. Вітчизняні виробники часто вдаються до імітації зарубіжних зразків, не підлаштовуючи їх під ґрунтові умови.

Наша команда представила новий підхід до вимірювання тягового опору та розробила методику прогнозування кінцевого фракційного складу. Крім того, ми розробили алгоритм комп'ютерного моделювання для моделювання процесу дроблення. Отриманий фракційний склад і коефіцієнт структури обчислюються та повідомляються в цьому дослідженні.

Було проведено порівняння нещодавно розробленого методу з уже існуючою технікою [20]. Результати свідчать про те, що використання попередньо визначених значень вихідних даних у моделі вносить значний ступінь помилки в результати обчислень, що робить неможливим включення відмінних аспектів дизайну конкретного інструменту.

Запропонована модель пропонує кілька переваг, зокрема, у чіткому поясненні процедур, пов'язаних із формуванням сколеної призми та її подальшим шліфуванням.

У роботі викладено запропоновану систему показників, яка дає змогу комплексно оцінювати ґрунтообробні машини різних конструкцій під час експериментальних досліджень. Завдяки використанню цих показників можна отримати вичерпну оцінку якості роботи машини.

Після завершення експериментальних досліджень було доведено, що розроблена математична модель дійсно є прийнятною. Враховуючи проведені заходи з охорони праці, аналіз показав, що конструктивні зміни не призвели до погіршення умов праці модернізованого агрегату.

На підставі проведеного техніко-економічного аналізу можна зробити висновок, що впровадження нової розробленої конструкції у виробництво дасть позитивні результати. Очікуваний річний економічний ефект становить 37 388,2 грн.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кобець, А. С., Теслюк, Г. В., Пугач, А. М., Золотовська, О. В., Лепеть, Є. І., & Бойко, В. Б. (2025). Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва.
2. Сіренко, Ю. В., & Сілюченко, В. М. (2022). ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р.)/ТДАТУ: ред. кол., СВ Кюрчев, ВМ Кюрчев, ВТ Надикто, ОГ Скляр [та ін.]– Запоріжжя: ТДАТУ, 2022.–239 с. У збірнику представлені матеріали міжнародної науково-практичної, 56.*
3. Różewicz, M. (2022). Review of current knowledge on strip-till cultivation and possibilities of its popularization in Poland. *Polish Journal of Agronomy*, 49, 20-30. <https://doi.org/10.26114/pja.iung.488.2022.49.03>
4. Грицаєнко, Г. І., & Грицаєнко, І. М. (2020). РОЗВИТОК АГРАРНОГО ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ ТА РИНКУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ УКРАЇНИ. *Редакційна колегія: ОГ Бондар, доктор юридичних наук, професор, 105.*
5. Труханська, О. О. (2020). Підвищення якості ремонту і технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.-Вінниця, 2018.-№ 3 (102)-С. 52-61.*
6. ПАТРАШКУ, О., & БРАЦЛАВЕЦЬ, Б. (2023). Підвищення ефективності функціонування машин та обладнання АПК за рахунок управління надійністю їх систем. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 323(4), 236-241.
7. Барабаш, Р. І. (2021). *Обґрунтування виробничої структури пунктів технічного обслуговування тракторів ХТЗ (Doctoral dissertation, Львівський національний аграрний університет).*

8. Устюянов, П. Д., Домуші, Д. П., Супрунюк, В. П., & Гуславський, А. В. (2022). ОСНОВНІ НАПРЯМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОГО СТАНУ ТЕХНІКИ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКУ АГРАРНИХ ПІДПРИЄМСТВ. *науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та*, 309.

9. Адамчук, В., Булгаков, В., Надикто, В., Троханяк, О., & Чорна, Т. (2023). Теоретичне дослідження стійкості руху асиметричного посівного машинно-тракторного агрегату. *Вісник аграрної науки*, 101(5), 57-64.

10. Товстенко, В. (2021). Удосконалення технічного обслуговування та ремонту машинно-тракторного парку в майстерні фермерського господарства «Славутич» Веселівського району Запорізької області: пояснювальна записка до дипломної роботи здобувача СВО Бакалавр.

11. Бабій, А. В., Вовк, І. В., & Бабій, В. А. (2024). Обґрунтування параметрів вала багатофункціонального ротаційного робочого органу. Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем, 9.

12. Бакляк, І. В. (2021). ПЛАНОВО-ЗАПОБІЖНА СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ МАШИН. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*, 465.

13. Romaneckas, K. (2022). Sustainable tillage and sowing technologies. *Agronomy*, 12(10), 2467. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102467>

14. Лесюк, В. С., & Калініченко, О. В. (2020). ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКУ АГРАРНИХ ПІДПРИЄМСТВ. *Редакційна колегія: ОГ Бондар, доктор юридичних наук, професор*, 274.

15. Адамчук, В., Камінський, В., Булгаков, В., & Надикто, В. (2022). Теоретичне дослідження та розроблення нового показника інтенсивності впливу ходових систем машинно-тракторних агрегатів на ґрунт. *Вісник аграрної науки*, 100(4), 57-63.

16. Yang, W., He, J., Lu, C., Lin, H., Yang, H., & Li, H. (2023). Current situation and future development direction of soil covering and compacting technology under precision seeding conditions in China. *Applied Sciences*, 13(11), 6586. <https://doi.org/10.3390/app13116586>

17. Адамчук, В., Булгаков, В., Надикто, В., Кюрчев, В., & Камінський, В. (2022). Дослідження впливу ширини захвату машинно-тракторного агрегату на його експлуатаційні показники. *Вісник аграрної науки*, 100(10), 29-36.

18. Домуці, Д. П., Яковенко, А. М., Осадчук, П. І., Ліпін, А. П., Житков, С. С., & Павлішин, П. М. (2020). РЕМОНТ ТРАКТОРІВ І АВТОМОБІЛІВ: навч. посібн.: у 2-х кн.–Кн. 1.

19. Іванов, Б. О., & Тітова, Л. Л. (2022). СТАН СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ НАДІЙНІСТЬ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ. *Збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції «HSEAgro–2022»*. 8-9 лютого 2022 року. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Науково-виробничий журнал «Промислова безпека», Державна служба України з питань праці. Київ. 2022. 186 с., 119.

20. Dnes, V., Kudrynetskyi, R., & Skibchuk, V. (2020). Методичні засади визначення ефективності використання техніки під час обробітку ґрунту, внесення добрив і сівби ярих культур за енергетичним показником. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*, (24), 77-82.

## ДОДАТКИ

Додаток А