

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему: «Дослідження процесу обробітку ґрунту з удосконаленням машини для диференційованого розпушення»

Виконав: студент 2 курсу, групи АІм-21 спеціальності 208 Агроінженерія за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія»

Ковальчук А.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник Цизь І.Є.

(прізвище та ініціали)

Гарант ОП Хомич С.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Дацюк Л.М.

(прізвище та ініціали)

Луцьк 2025

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

	к-сть листів
1. Вихідні дані	1 лист
2. Теоретичні положення	1 лист
3. Апаратура та обладнання для експериментальних досліджень	1 лист
4. Результати експериментальних досліджень	1 лист
5. Планування та результати експерименту з використанням математичного методу планування	1 лист
6. Схема експериментальної установки чи досліджуваної машини (функціональна або принципова)	1 лист
7. Складальне креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	1 лист

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Юхимчук С.Ф., доцент		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою, формування завдань досліджень	01.07. – 16.07.2025 р.	
2	Обґрунтування конструкції і теоретичні дослідження	20.08 – 31.08.2025 р.	
3	Розробка схеми експериментальної установки чи досліджуваної машини	01.09 – 30.09.2025 р.	
4	Розробка програми і методики експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2025 р.	
5	Реалізація та обробка результатів експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2025 р.	
6	Експериментальні дослідження з використанням математичного методу планування	15.10 – 01.11.2025 р.	
7	Розробка креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	01.11 – 15.11.2025 р.	
8	Узагальнення результатів та оформлення пояснювальної записки	15.11 – 25.11.2025 р.	
9	Оформлення ілюстративного матеріалу для захисту магістерської роботи	15.11 – 25.11.2025 р.	
10	Нормоконтроль	до 04.12.2025 р.	
11	Представлення кваліфікаційної роботи на перевірку на плагіат	04.12.– 14.12.2025 р.	

Студент

_____ (підпис)

Ковальчук А.П.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Цизь І.Є.

_____ (прізвище та ініціали)

Гарант ОПП

_____ (підпис)

Хомич С.М.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ковальчук А.П. Дослідження процесу глибокого розпушення з удосконаленим ґрунтообробним агрегатом та його робочим органом. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Агроінженерія» спеціальності 208 Агроінженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел, додатків (згідно структури кваліфікаційної роботи, затвердженої кафедрою).

У роботі наведено результати комплексних теоретичних та експериментальних досліджень, які дозволили розробити конструкцію машини для диференційованого дослідження та її робочого органу на основі показників твердості та значення зусилля при його заглибленні у ґрунт.

Ключові слова: Глибоке розпушення, ґрунт, твердість, плужна підшва, ґрунтообробна машина, робочий орган (зуб), потужність, зусилля при заглибленні.

ABSTRACT

Kovalchuk A.P. Study of the deep loosening process using an improved tillage implement and its working tool. Manuscript.

Master's qualification thesis in the Educational Program "Agroengineering", Specialty 208 Agroengineering. Lutsk National Technical University, Lutsk, 2025.

The Master's qualification thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions and recommendations, a list of references, and appendices (in accordance with the structure of the qualification thesis approved by the department).

The thesis presents the results of comprehensive theoretical and experimental studies that made it possible to develop the design of a machine for differentiated soil loosening and its working tool based on soil hardness indicators and the values of the force required for its penetration into the soil.

Keywords: deep loosening, soil, hardness, plow pan, tillage machine, working tool (chisel), power, penetration force.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ	Ошибка! Закладка не определена.
АНОТАЦІЯ	3
ABSTRACT	4
ЗМІСТ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1	10
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ	10
ДОСЛІДЖЕНЬ	10
1.1 Сучасні системи землеробства та знаряддя для обробітку ґрунту.....	10
1.2 Аналіз конструкції машин для глибокого розпушення ґрунту.....	18
1.3 Огляд досліджень впливу твердості ґрунту на продуктивність рослин .	25
РОЗДІЛ 2	29
ПРОЕКТНА ЧАСТИНА	29
2.1 Обґрунтування конструкції машини для глибокого обробітку ґрунту. Принцип її роботи.	29
2.2. Визначення тягового зусилля розроблюваної машини для глибокого розпушення ґрунту.....	34
2.3. Розрахунок конструктивних параметрів машини для глибокого обробітку ґрунту	37
РОЗДІЛ 3	41
ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ..	41
3.1. Програма експериментальних досліджень.....	41
3.2. Лабораторне обладнання, прилади, вимірювальна апаратура, які використовувались в дослідженнях	42
3.3 Методика проведення тарування скоби динамометричної, визначення тарувального коефіцієнта та зусилля, яке відповідає одиниці деформації скоби	45
3.4 Методика вимірювання твердості ґрунту з твердоміром «ЛАН-М PRO» .	47
3.5 Дослідження зусилля, яке затрачається під час заглиблення робочого органу у шар ґрунту	50
РОЗДІЛ 4	52
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	52
4.1 Результати тарування динамометричної скоби та визначення тарувального коефіцієнта.....	52

	6
4.2 Результати дослідження твердості ґрунту	53
4.3 Результати вимірювання зусилля заглиблення робочих органів ґрунтообробного знаряддя	57
ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
ДОДАТКИ	66

ВСТУП

Актуальність дослідження. Сучасне сільськогосподарське виробництво характеризується високим рівнем механізації, інтенсифікацією технологічних процесів, зростанням маси та потужності ґрунтообробної, посівної, самохідної техніки. Поряд із позитивними наслідками це призводить до переущільнення орного та підорного шарів ґрунту, формування плужної підшви, погіршення водно-повітряного режиму, зниження рівня гумусу та поживних речовин у ґрунті що негативно впливає на розвиток кореневої системи рослин і рівень урожайності.

Одним із найбільш ефективних способів усунення наслідків переущільнення глибоке розпушення ґрунту, яке на відміну від традиційної оранки, забезпечує руйнування переущільнених шарів на глибинах 25-45 см без обертання пласта. Це сприяє покращенню структури ґрунту, підвищенню його пористості, водопроникності та створенню сприятливих умов для розвитку кореневої системи навіть при недостатньому, обмеженому зволоженні.

Ефективність глибокого розпушення значною мірою залежить від конструктивних особливостей робочих органів, їх геометричних параметрів і рівнем енергетичних витрат при роботі в переущільнених ґрунтових горизонтах.

Перспективним технічним рішенням у цьому напрямі є ґрунтообробний агрегат, призначений для глибокого розпушення шляхом формування отворів в ґрунті та часткового винесення ґрунтової маси на поверхню без обертання пласта.

У зв'язку із цим актуальним є дослідження та удосконалення ґрунтообробних агрегатів, здатних забезпечити ефективне руйнування ущільнених шарів ґрунту за мінімальних енергетичних та економічних витрат.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу глибокого обробітку ґрунту шляхом удосконалення машини для диференційованого розпушення на основі дослідження енергетичних та

технологічних параметрів роботи її робочих органів у зонах переущільнення ґрунту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити технологічний процес глибокого розпушення ґрунту методом проколювання з формуванням отворів заданої глибини;
- вивчити конструкцію та принцип дії машини для диференційованого розпушення ґрунту;
- провести польові випробування робочого органу машини з визначенням енергетичних витрат під час заглиблення та виглиблення зуба;
- оцінити зміну щільності та інших фізико-механічних властивостей ґрунту в зоні дії робочого органу;
- встановити залежність між глибиною розпушення, ступенем ущільнення ґрунту та величиною тягового опору;
- обґрунтувати напрями удосконалення конструкції машини для забезпечення диференційованого обробітку ґрунту з мінімальними енергетичними витратами.

Об'єктом дослідження. Процес глибокого обробітку ґрунту з використанням машин для диференційованого розпушення ущільнених шарів ґрунту

Предметом дослідження. Конструктивні параметри робочих органів ґрунтообробної машини та закономірності їх взаємодії при диференційованому розпушення з ґрунтовим середовищем.

Методи та способи вирішення поставлених завдань. У роботі було використано комплекс теоретичних та експериментальних методів досліджень. Теоретичне вивчення процесу глибокорозпушення ґрунту та обґрунтування параметрів роботи робочого органу здійснювався аналізу науково-технічних джерел та положень теоретичної механіки. Експериментальні дослідження включали вимірювання твердості ґрунту та польові випробування робочого органу з визначенням зусилля при його заглибленні. Були реалізовані з

допомогою електронного твердоміра, приладу КПр-1 РС, скоби динамометричної з індикатором переміщення.

Науково-технічна новизна одержаних результатів:

- обґрунтування глибини обробітку машини для диференційованого розпушення;
- встановлено залежність потужності від зміни радіус робочого органу, відстані між дисками ротора, ширини захвату агрегату;
- розроблено функціональну схему машини для диференційованого розпушення ґрунту;
- проведено експериментальні дослідження зусилля при проникненні робочого органу в ґрунт та встановлено його залежність від показників твердості ґрунтового шару.

Практичне значення одержаних результатів. Комплекс теоретичних та експериментальних досліджень дозволив розробити конструкцію робочого органу для здійснення глибокого розпушення.

Апробація роботи. Основні положення наукових досліджень, що містяться в роботі, обговорювались та доповідались на засіданнях наукового гуртка «Агротех»

Публікації. Основні дослідження кваліфікаційної роботи опубліковано у статті у фаховому науковому виданні.

Положення що виносяться на захист. Конструкція машини для диференційованого розпушення на основі показників твердості ґрунту та експериментально та теоретично обґрунтовані конструкційні та технологічні параметри її робочого органу.

Структура і обсяг магістерської роботи. Структурно-логічна будова роботи у зв'язку з необхідністю розв'язання поставлених задач була наступною: вступ, чотири розділи, висновки, список джерел посилання з 33 назв та 1 додатка. Основна частина магістерської роботи розміщена на 55 сторінках

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Сучасні системи землеробства та знаряддя для обробітку ґрунту

Родючість ґрунту є одним з основних чинників стабільного розвитку сільськогосподарської сфери. Вона має великий вплив на врожайність та якість вирощуваних культур, від неї залежить рівень продовольчої безпеки. Збереження та підвищення родючості дозволить раціонально та ефективно використовувати ґрунтові ресурси. [1]

Ключовим фактором, що впливає на родючість ґрунту є його структура, яка складається з агрегатів різних за розміром та формою. Частинки ґрунту діаметр яких становить від 0,25 до 10 мм з агрономічної точки вважають найціннішими. Такі агрегати забезпечують сприятливі повітряний та водний режими [2]. Науково доведено, що оптимально структурований ґрунт повинен містити близько 80% повітряно-сухих агрегатів зазначеного розміру, причому щонайменше 70% з них мають бути стійкими до руйнування водою [3]

Структура ґрунту формується шляхом механічного поділу його моноліту на окремі агрегати. Цей процес зумовлений впливом механізованого обробітку, зволоження, висихання, нагрівання, замерзання ґрунту; пов'язаний з розвитком корневих систем рослин та діяльністю ґрунтових організмів. [4; 5].

Ступінь структурності ґрунту безпосередньо пов'язаний з його щільністю. Вона визначається відношенням абсолютно сухого ґрунту у непорушному стані до його об'єму разом із порами та вимірюється в г/см^3 [6].

Щільність є комплексною характеристикою агрофізичного стану ґрунтового середовища. Значення щільності ґрунту в межах 1,0-1,3 г/см^3 вважається оптимальною для більшості культурних рослин. У практичних дослідженнях додатково використовують поняття рівноважної щільності, під якою розуміють таку щільність, якої ґрунт досягає за відсутності його механізованого обробітку протягом тривалого часу. Цей показник можна

вважати відносною константою для певного типу ґрунту, оскільки його зміни у часі незначні та обумовленні природними та антропогенними чинниками [7].

Для забезпечення оптимального росту та розвитку сільськогосподарських культур, під час їх вирощування виникає потреба у регулюванні щільності ґрунту. Для цього використовують механізований обробіток, процеси якого можна розділити на прості та складні. Під простими розуміють розпушення, ущільнення, переміщення, різання ґрунту тощо. До складних процесів відноситься поєднання декількох простих операцій. У результаті такого поєднання виникають різні види механізованого обробітку, наприклад оранка, лущення, боронування, коткування, глибоке розпушення тощо [8].

Однак, оптимальні параметри щільності, яких надають ґрунту механізованим способом, зберігаються недовго. Упродовж 40-60 днів залежно від інтенсивності впливу природних чинників відбувається повернення до стану близького до рівноважного. Це зумовлює постійну динаміку зміни структури та щільності поверхневого шару ґрунту товщиною 15-25 см, де одночасно відбуваються процеси руйнування та утворення агрегатів. Причини руйнування структури ґрунту розділяють на три групи: механічні, біологічні, фізико-хімічні.

Механічні причини включають руйнування ґрунтових агрегатів унаслідок дії сільськогосподарських машин та знарядь під час обробітку, а також від ударів крапель дощу, граду та інших подібних впливів.

Фізико-хімічні причини пов'язані зі змінною складу ґрунтового розчину, вологості, внесенням добрив, засвоєнням поживних речовин рослинами. Вони відрізняються за впливом на структурність через міцність і руйнування агрегатів. Вміст органічної речовини є найбільш вагомим фактором, що забезпечує коагуляцію первинних часток та їх з'єднання у грудочки.

Біологічні причини пов'язані з мінералізацією органічної речовини аеробними бактеріями, що відбувається на поверхні кожного ґрунтового агрегату. Внаслідок цього процесу відбувається руйнування структури. Однак, продукти життєдіяльності цих мікроорганізмів дуже важливі для міцності ґрунтових агрегатів [9].

Одним із основних методів формування оптимальної структури та щільності ґрунту для вирощування сільськогосподарських культур, як зазначалось раніше є механізований обробіток. Розроблено різні системи обробітку, що різняться за ступенем впливу на ґрунт.

Оранка вважається основним елементом традиційної системи обробітку. Вона є перевіреним способом регулювання щільності ґрунту, що має певні переваги та недоліки. Основна перевага цього методу полягає в тому, що за один прохід плуг заробляє рослинні рештки, рівномірно та ретельно змішує їх із шаром ґрунту, формує структуру ґрунту, необхідну для правильного росту та розвитку сільськогосподарських культур. Але при цьому використання оранки сприяє утворенню переущільненню шарів ґрунту в зоні дії лемеша та польової дошки на підорний шар, що призводить до формування «плужної підшви» (рис.1.1) [10].



Рисунок 1.1 Фото процесу оранки полицевим плугом

Крім того, інтенсивне перемішування ґрунту під час оранки призводить до значних втрат вологи, що є дуже серйозною проблемою за сучасних умов зміни клімату. Це може сповільнити та ускладнити проростання сходів. Також додатково на це можуть вплинути інтенсивні опади після сівби, що спричиняють утворення переущільненої кірки на поверхні ґрунту. Використання цього методу підвищує ризик водної та вітрової ерозії. Ще одним

недоліком оранки є зменшення чисельності ґрунтових черв'яків через інтенсивну дію полиці корпусу плуга. Також варто відзначити значні економічні втрати під час використання цього енергозатратного способу обробітку. Хоча й плуг належить до відносно недорогих знарядь, але під час його застосування на великих площах ця перевага втрачається. Для якісної оранки важливо, щоб ґрунт мав оптимальну вологість для формування структури, що значно обмежую строки її проведення, особливо на важких ґрунтах. У великих господарствах це може створити додаткові труднощі з дотриманням агротехнічних строків, особливо восени.

Мінімальний обробіток (Mini till) – система обробітку, що характеризується відсутністю полицевої оранки та ґрунтується на менш інтенсивному впливі на ґрунт порівняно з традиційною системою.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.2 а - збір врожаю з одночасним подрібненням поживних решток, б - лущення стерні; в - обробіток ґрунту дисковими боронами; г - глибоке рихлення ґрунту.

Технологія мінімального обробітку передбачає наступні технологічні елементи:

- подрібнення пожнивних решток та соломи з одночасним збиранням комбайнами врожаю (рис. 1.2, а);
- лущення стерні на глибину 6-7 см безпосередньо після збирання попередника (рис. 1.2, б);
- осінній обробіток поверхні ґрунту на глибину 15-18 см з застосуванням дискових борін (рис. 1.2, в);
- глибоке розпушення ґрунту на глибину 35-40 см, що проводиться один раз на три роки.

Використання зазначених операцій сприяє зменшенню втрат вологи ґрунту. Суміш ґрунту та рослинних решток, що утворилось на поверхні після такого обробітку запобігають формуванню ґрунтової кірки, що знижує ризики проявів вітрової та водної ерозії. Також активізуються біологічні процеси у верхніх шарах. Крім того, стимулюються процеси нітрифікації завдяки якісному перемішуванню пожнивних решток з ґрунтовою масою.

Технологія Mini-till має наступні переваги:

- зменшення кількості проходів техніки по полі, як наслідок знижується тиск на ґрунтову поверхню;
- зменшення механічного впливу на ґрунт;
- значне скорочення витрат енергетичних ресурсів у розрахунку на одиницю площі поля;
- зниження ризиків прояву вітрової та водної ерозії;
- збереження та поліпшення родючості ґрунту;
- активізація процесу мінералізації рослинних решток.

Разом і з тим, в такій системі обробітку присутні деякі недоліки:

- переущільнення верхнього шару ґрунту та його поступове підкислення;
- значне підвищення засміченості посівів бур'янами, відповідно збільшуються витрати на боротьбу з ними;
- необхідність врахування усіх властивостей ґрунту (його щільність, вміст гумусу та поживних речовин);

- потреба у придбанні спеціалізованої та дороговартісної техніки. [11].

Сучасна система землеробства No-till або нульовий обробіток спрямований на збереження природної, рівноважної структури ґрунту. Полягає в безпосередній сівбі у стерню або післяжнивні рештки після збирання без попереднього обробітку ґрунту. Сформований шар мульчі з подрібненої соломи захищає ґрунт від випаровування вологи, впливу водної та вітрової ерозії, покращує родючість, запобігає деградації ґрунтів [12].

Основними принципами нульової системи обробітку є:

- повна відмова від механізованих способів обробітку ґрунту, таких як полицева оранка, боронування, культивація та інші аналогічні операції;
- відмова від удобрення органічними добривами;
- обов'язкове збереження подрібнених пожнивних решток та стерні на поверхні поля;
- здійснення комплексного посіву польових культур з одночасним внесенням мінеральних добрив, засобів захисту з допомогою спеціалізованих сівалок. (рис. 1.3 а)



а)



б)

Рисунок 1.3 а - фото процесу сівби за технологією No-till, б - отриманні сходи

До основних переваг системи обробітку No-till відносяться:

- збереження вологи в ґрунті через відсутність механічного обробітку та наявності шару мульчі на його поверхні;
- збереження рівноважної структури та щільності ґрунту, через відсутність впливу механізованого обробітку;

- збереження ґрунтових організмів, в тому числі популяції дощових черв'яків, які важливі для утворення гумусу та підтримання родючості ґрунту;
- захист від водної та вітрової ерозії за рахунок пожнивних решток та стерні на поверхні поля;
- забезпечення оптимальної температури ґрунту, влітку поверхня ґрунту не перегрівається, а взимку не перемерзає.

До ключових недоліків технології No-till належать:

- повільніше прогрівання ґрунту навесні в наслідок наявності великого шару пожнивних решток на поверхні, що особливо відчутно після вирощування кукурудзи;
- надмірне зволоження у верхніх шарах ґрунту в ділянках низькою водопроникністю, на осушених землях знижується ефективність роботи дренажних систем;
- зростання витрат на боротьбу з бур'янами (на 15-100% більші в порівнянні з іншими технологіями землеробства);
- зростають ризики для повноцінного росту та розвитку культурних рослин через накопичення у шарі мульчі збудників хвороб та інфекцій, а також різноманітних шкідників;
- підвищена пожежонебезпека на полях у періоди тривалої відсутності опадів;
- необхідність використання високотехнологічних дороговартісних посівних комплексів, купівля та обслуговування яких потребує значних затрат. [13].

Технологія смугового обробітку ґрунту (Strip-till) поєднує в собі переваги традиційної системи обробітку та системи No-till, водночас частково усуває їхні недоліки. Характеризується механічним розпушенням смуг шириною 20-25 см на глибину 20-30 см із одночасним внесенням та заробленням мінеральних. У результаті близько двох третин поверхні поля, залежно ширини міжрядь вирощуваної культури, залишаються необробленими, а внесені туки концентруються безпосередньо в зоні кореневої системи рослин, що робить їх

більш доступними. Такий підхід дозволяє раціонально використовувати площу поля завдяки чергуванню засіяних ділянок поля із тими, що відновлюються. Оптимальною для впровадження цієї системи вважається ширина міжрядь не менше 45 см, що забезпечить її ефективне та раціональне використання. Всі операції смугового обробітку можна виконувати як восени, так і навесні поєднавши сівбу з внесенням добрив. Найчастіше технологія Strip-till використовується для вирощування соняшнику, кукурудзи, сої та інших просапних культур. Натомість для зернових вона не застосовується.

До основних переваг технології смугового обробітку відносять:

- здійснення механізованого обробітку комбінованим знаряддям під час сівби за один прохід техніки (рис 1.4);
- можливість локально вносити добрива на різні глибини, що дозволяє відмовитись від додаткових операцій для підживлення посівів;
- збереження та підтримання родючості ґрунту, формування сприятливої структури та щільності;
- зниження ризиків прояву вітрової та водної ерозії;
- забезпечення швидкого проростання насіння та появи сходів, завдяки доступних для кореневої системи рослин поживних речовин (рис. 1.5)
- пришвидшене проростання насіння внаслідок достатнього прогрівання обробленої смуги ґрунтової поверхні. [14].



Рисунок 1.4 Фото суміщених процесів обробки ґрунту та посіву за системою смугового обробітку (Strip-till)



Рисунок 1.5 Фото сходів за системою Strip-till

Головний недолік системи Strip-till – необхідність використання спеціалізованого обладнання та агрегатів, призначених для обробітку ґрунту, внесення добрив та здійснення посіву, які мають високу вартість.

Серед важливих умов ефективного впровадження смугової системи обробітку є узгодження параметрів ходової частини трактора з робочою шириною міжрядь, також оснащення техніки сучасними системами GPS-навігації, що забезпечить високу точність виконання операцій.

Отже, як традиційна система обробітку ґрунту, так і сучасні інноваційні технології, мають свої переваги та недоліки. Доцільність та ефективність їх застосування залежить від природно-кліматичних умов та особливостей ґрунтів конкретного регіону. Водночас збереження та покращення родючості має бути головним критерієм при виборі впровадження системи обробітку.

1.2 Аналіз конструкції машин для глибокого розпушення ґрунту

В останні роки спостерігається стійка тенденція до посилення впливу інтенсифікації сільськогосподарського виробництва на ґрунти, що становить серйозну загрозу їх родючості, пришвидшує процеси їх деградації та є одним із ключових факторів розвитку ерозії. За результатами наукових досліджень, що під час виконання польових робіт сільськогосподарська техніка залишає сліди на 40-80% площі оброблювальної ділянки, причому на поворотні смуги ще більше проходів та навантаження. З огляду на тенденцію збільшення маси

сільськогосподарських машин негативний вплив поширюється не лише на орний шар ґрунту, а й на підорний шар, проникаючи на глибину 1-1,5 м. Це зумовлює зниження загальної та капілярної пористості ґрунтового шару. Підвищення щільності та твердості ґрунту призводить до зниження та пригнічення ґрунтової фауни, в результаті виникають значні втрати врожаю приблизно на 20-30% [15].

Накопичення вологи під час дощових періодів, її збереження та доступність посушливі періоди значною мірою залежить від наявності переущільненого шару ґрунту, який формується внаслідок впливу сільськогосподарської техніки, в тому числі полицевого плуга. За цих умов у рослин формується слаборозвинена коренева система (рис 1.6), що призводить до неповного використання їх потенціалу та зниження врожайності. Надмірно ущільнений ґрунт втрачає здатність ефективно поглинати вологу: при наявності підплужної підшви показники засвоєння атмосферних опадів зменшуються у 3-4 рази. Порушення газообміну в переущільненому ґрунті призводить до зниження інтенсивності виділення вуглекислого газу (CO_2) в 1,2-1,8 рази, що негативно позначається на забезпеченні рослин вуглецем. [16].



Рисунок 1.6 Порушення росту кореневої системи рослин за наявності ущільнення ґрунту

Найбільш ефективним і доступним способом збільшення глибини розпушеного шару є використання глибокорозпушувачів (чизелів). Такий обробіток передбачає рихлення, кришення, часткове перемішування ґрунту без обертання пласта. В результаті роботи такого агрегату відбувається розуцільнення орного шару, спрямоване на зниження ризиків прояву водної ерозії. Також на поверхні поля залишається стерня та рослинні рештки, що природньо закріплюють поверхню ґрунту та захищають її від видування вітром. [15].

Глибокорозпушувачі конструктивно складаються з двох основних типів робочих органів, закріплених на рамі. А саме розпушуючі різці або лапи. Робочі органи заглиблюються в шар ґрунту та розрізають його. Найчастіше на глибокорозпушувачах після лап встановлюються зубчасті котки, які додатково розпушують та подрібнюють ґрунт (рис. 1.7). Важливою функцією катка є переміщення та часткове загортання рослинних решок з поверхні поля, що додатково збагачує орний шар поживними речовинами [17].



Рисунок 1.7 Глибокорозпушувач обладнаний подвійним зубчастим катком

Розглянемо варіанти глибокорозпушувачів, які пропонують провідні світові виробники.

Фірма Dante пропонує універсальний глибокорозпушувачі моделі Ages (рис 1.8, а) призначений для руйнування ущільненого підорного шару на глибину до 55 см. Лапа товщиною 35 мм з спеціальним профілем, зменшує тягове зусилля та покращує перемішування ґрунту. Завдяки особливій конструкції робочих

зубів із боковими підрізачами (1.8, б) відбувається перемішування та руйнування ущільненого шару у верхній частині оброблюваного шару ґрунту. Також вони забезпечують ефективне підрізання бур'янів та рослинних решток. Катки встановлені за робочими органами подрібнюють вже раніше розрихлений ґрунт та пожнивні рештки, заробляючи їх на глибину 15-20 см, також вирівнюють поверхню поля.



а)



б)

Рисунок 1.8 а - глибокорозпушувач фірми Dante, б - робочий зуб з боковими підрізачами

Зменшення тягово опору та енергетичних витрат, може бути реалізоване завдяки використанню долотоподібних лап активного рихлення без крил. Однак в такому випадку зменшується зона інтенсивного впливу на підорний шар ґрунту. Компанія Лутра пропонує глибокорозпушувачі такої конструкції (рис. 1.9). Машини такого типу отримали назву глибокорозпушувачів-щілювачів, оскільки їхні робочі органи формують у ґрунті щілини, прорізані стійками. [18].



Рисунок 1.9 Глибокорозпушувач-щілювач компанії Јутра

Окрему групу глибокорозпушувачів становлять стрілоподібні агрегати, їх пропонує польська фірма Unia (рис 1.10). Конструктивною особливістю таких машин є оснащення робочими органами у вигляді циліндричних полиць із лемішами. Робочі органи розміщаються попарно у дзеркальному відображенні, що забезпечує рихлення ґрунту внаслідок його стискання поверхнями сусідніх робочих елементів. Максимальна глибина обробітку такими агрегатами становить 45 см.



Рисунок 1.10 Глибокорозпушувач UNIA PLOW

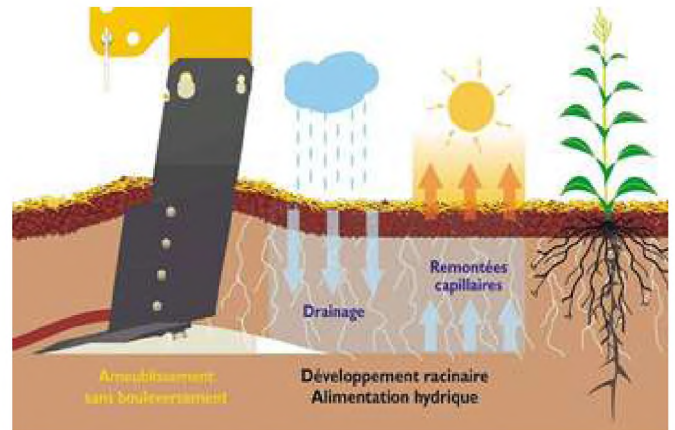
Французька компанія Agriset виготовляє глибокорозпушувачі моделі CultiPlow Platinum (рис. 1.11, а) оснащені унікальними лапами зі зміщенням, що забезпечують рівномірне розпушення по всій ширині агрегату на глибину до 45 см.

Машина виконує хвилеподібну технологію розпушування ґрунту (рис 1.11, б). Полягає вона у підйомі та розпушенні ґрунтового шару завдяки створенню повздожньої хвилі в напрямку руху агрегату. У процесі проходження хвилі шар ґрунту тричі перегинається, що забезпечує ефективне рихлення з мінімальними енергетичними та паливними витратами.

Агрегат оснащений секцією дисків, встановлених по заду валу. Її функціональне призначення полягає у подрібненні та вирівнюванні верхнього шару ґрунту.



а)



б)

Рисунок 1.11 Глибокорозпушувач Agrisem CultiPlow Platinum (а),
хвилеподібна технологія розпушення (б)

З метою формування сприятливої структури у поверхневому шарі ґрунту для проростання насіння та здійснення глибокорозпушення було сконструйовано ґрунтообробну машину з ярусним розташуванням робочих органів (рис. 1.12). У якості робочих органів використано модифіковані стрілчасті лапи, конструктивно схожі на лапи глибокорозпушувача Dante (рис. 1.8 а). Така схема розміщення коли лапи і з більшою глибиною обробітку розташовані по заду лап і з меншою глибиною, дозволяє знизити тяговий опір машини на 18%.



Рисунок 1.12 Культиватор-глибокорозпушувач із ярусним розташуванням робочих органів [19]

Отже, результати проведеного аналізу вказують на широку різноманітність конструкцій агрегатів призначених для глибокого розпушення ґрунту та руйнування підплужної підшви. У той же час ці машини високопродуктивні під час їх роботи потрібна значна тягова потужність, що зумовлює необхідність агрегування з енергонасиченими тракторами. Ще одним недоліком таких глибокорозпушувачів є високі витрати паливо, навіть за оптимальних умов енергоспоживання вони залишаються набагато вищими у порівнянні з іншими методами обробітку ґрунту. Ще одним фактором, що стримує широке застосування агрегатів для глибокого рихлення є висока вартість імпортних машин та запасних частин до них, які представлені на ринку сільськогосподарської техніки [20; 21].

Отже, виникає необхідність у розробці ґрунтообробної машину, що здатна виконувати глибоке розпушення та руйнування плужної підшви з зменшеними енергетичними та економічним витратами. Така машина повинна забезпечити якісний обробіток, раціональне використання тягової потужності трактора та підвищення загальної ефективності технологічного процесу обробітку ґрунту.

1.3 Огляд досліджень впливу твердості ґрунту на продуктивність рослин

Важливою передумовою сталого розвитку національної економіки України є її унікальний земельно-ресурсний потенціал. Ефективне та раціональне використання земельних ресурсів відіграє ключову роль у забезпеченні економічної стабільності держави. У сучасних умовах особливо актуальні дослідження, спрямовані на оцінку стану системи землекористування, визначення шляхів її оптимізації. Важливим аспектом також організація управління земельними ресурсами та їх регулювання.

В Україні все більшої актуальності набуває оцінка агрофізичного стану ґрунтів у зв'язку розширенням технологій обробітку, змін структури посівних площ, поступової його деградації. Ключового значення набувають такі показники, як твердість та щільність ґрунту у зв'язку з значним впровадженням мінімізації основного обробітку та часткової відмови від традиційної оранки [22].

Через домінування нераціональної системи землекористування відбуваються процеси деградації родючих ґрунтів. За результатами досліджень проведених фахівцями галузі ґрунтознавства, станом на 2015 рік не менше ніж 35% площі ріллі в Україні перебувають в стані деградації за показником рівноважної щільності. На сьогодні цей показник значно зростає. Близько 57% території країни уражено процесами вітрової та водної ерозії, більше 12% площ зазнають підтоплення. Тому одним з ключових заходів щодо стабілізації та досягнення нейтрального рівня деградаційних процесів є встановлення площ з ґрунтами, твердість яких не перевищує допустимі показники [23; 24].

На відміну від показника щільності, твердість належить до міцнісних характеристик ґрунту, а також є однією з ключових фізико-механічних та технологічних властивостей ґрунту. За її значення цього показника залежить опір ґрунту вертикально прикладеному навантаженню, що спричиняє такі процеси, як розклинення, здавлювання, розрізування [25]. Цей показник визначається мінералогічним і гранулометричним складом ґрунту, рівнем його структурності, вмістом гумусу, вологістю. Вимірюється у $\text{кг}/\text{см}^3$ або кПа [26].

Експериментальні дослідження показали, що розпушення підорного шару ґрунту істотно впливає на швидкість проникнення коріння рослин у глибші

грунту. (рис. 1.13). Проаналізувавши наведений графік видно, що у варіанті без глибокого розпушення спостерігається помітне уповільнення розвитку кореневої системи культурних рослин протягом перших 30 днів у порівнянні з ділянками, де ґрунт було проведене глибоке розпушення.

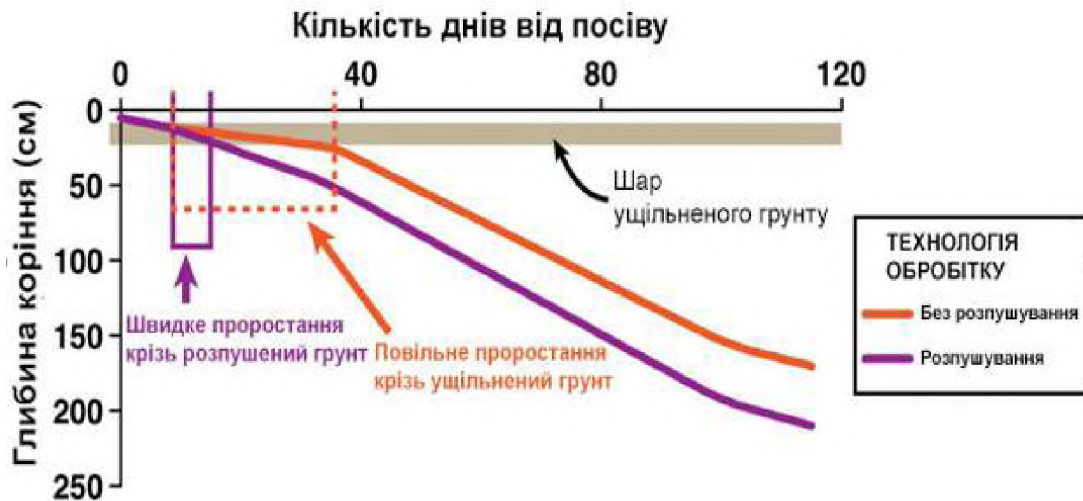


Рисунок 1.13 Залежність швидкості проникнення коріння рослин для умов глибокого розпушення та за його відсутності [19]

За версією компанії Юмра на рис. 1.14 показано візуалізацію впливу глибокорозпушення на ріст та розвиток рослин кукурудзи.

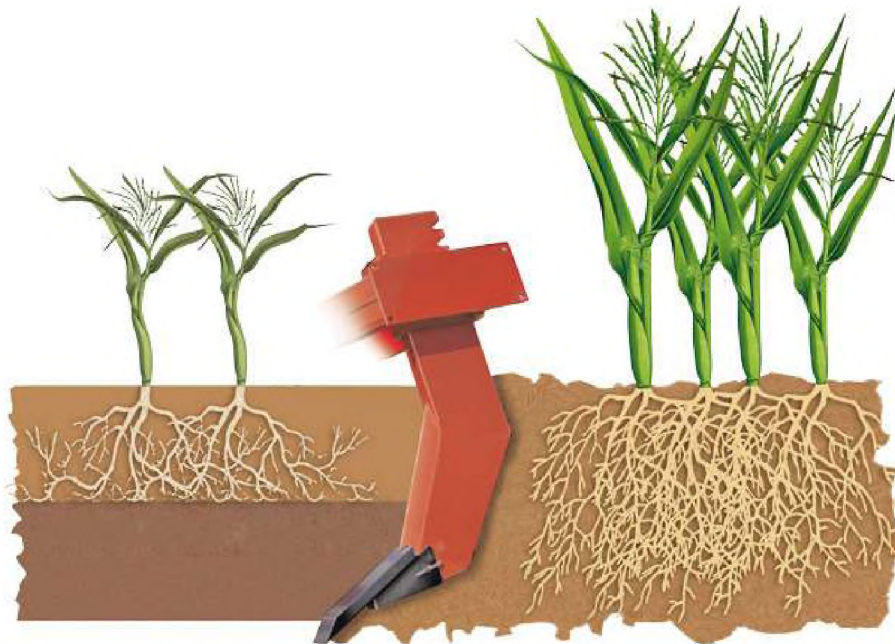
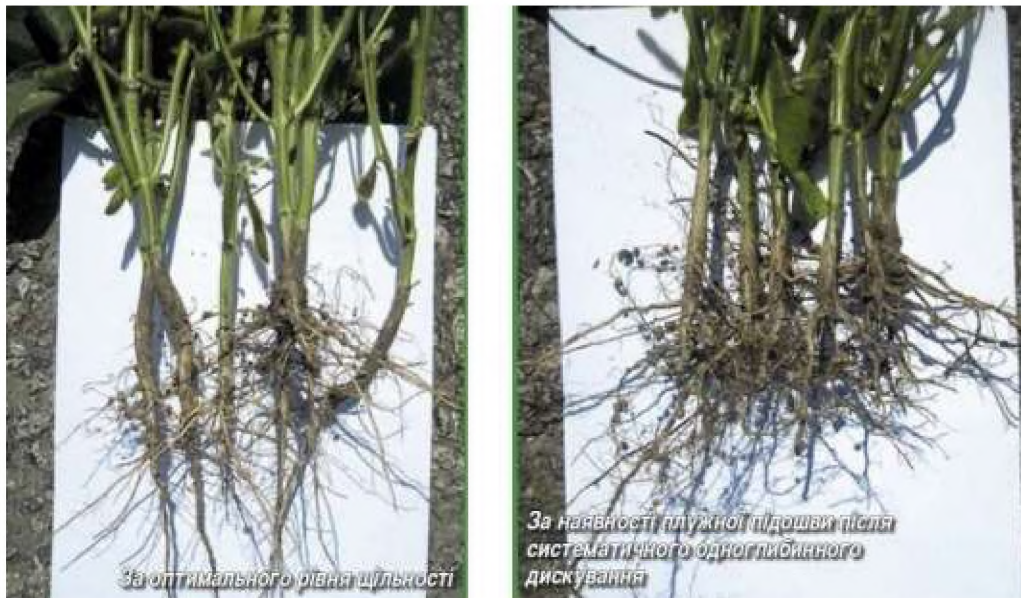


Рис 1.14 Вплив глибокого розпушення на ріст та розвиток кукурудзи

Вагомий внесок у теоретичне та експериментальне вивчення процесів ущільнення ґрунту, їх вплив на ріст та розвиток рослин зробив академік Медведєв. У своїх дослідженнях він встановив, що твердість ґрунту в зоні підплужної підшви становить понад 35-40 кгс/см² негативно впливає на ріст та розвиток кореневої системи культурних рослин, тоді як показник твердості в межах 20-25 кгс/см² вважають допустимим. Крім, того роботах автора подано аналіз та огляд конструкцій твердомірів та методики їх практичного застосування.

Результати досліджень впливу підплужної підшви на формування та розвиток кореневої системи рослин сої наведені у праці [27]. Із зображення представленого в публікації (рис 1.15), видно, що наявність переущільнення в підорному шарі перешкоджає проникненню коренів рослин у більш глибокі шари ґрунту. Автор дослідження зазначає, що за таких умов у сої формується переважно мичкувата коренева система: близько 80% коренів зосереджуються у верхньому шарі ґрунту товщиною 5-10 см, тоді як лише близько 20% проникає у нижчі шари ґрунту.



а

б

Рисунок 1.15 Вигляд кореневої системи сої: а – за оптимального рівня щільності та твердості в підорному шарі; б – за наявності плужної підшви

У праці [28] представлено аналіз сучасних технічних засобів, призначених для визначення твердості ґрунту, зокрема розглянуті ґрунтові сканери. Оцінено їх основні переваги та недоліки.

Результати всіх проведених досліджень підтверджують, що зі збільшенням густоти вимірювань підвищується точність та репрезентативність отриманих даних. Також акцентується увага на доцільності використання постійної сітки вимірювань з прив'язкою до контурів поля.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування конструкції машини для глибокого обробітку ґрунту.
Принцип її роботи.

На основі висновків, отриманих у попередньому розділі, встановлено необхідність створення агрегату для глибокого розпушення, під час роботи якого буде забезпечена висока продуктивність з меншими енергетичними затратами.

Запропонована корисна модель належить до сільськогосподарського машинобудування, зокрема до техніки для обробітку ґрунту, та може бути використана для здійснення глибокого розпушення. Відомий агрегат складається з ротора, утвореного парним набором коліс із шарнірно закріпленими робочими циклоїдної форми. Усередині кожної пари коліс розміщено пару опорних роликів, які забезпечують регулювання режиму роботи такого робочого органу. [29]. Основними недоліками такої конструкції такої машини є складність системи регулювання робочих режимів, складність привідних механізмів; в агрегаті відсутній механізм регулювання глибини обробітку, а також здатність здійснювати лише поверхневий обробіток ґрунту.

За технічною суттю найбільш близькою до запропонованої моделі є машина для здійснення обробітку ґрунту, що включає раму, на якій у підшипникових опорах встановлено ротор, утворений системою дисків, з'єднаних спільною віссю. У підшипникових опорах на дисках розміщені осі з робочими органами, оснащеними кронштейнами та демпферними пристроями. Останні виконані у вигляді пружин із регульовальними упорами [30]. Головними недоліками такої техніки є складність та недостатня надійність демпферних пристроїв робочих органів, обмежена ефективність під час обробітку, оскільки робочі органи здатні проколювати отвори лише через ущільнення бічних стінок отвору. Крім того, спостерігається нерівномірність тягового опору через те, що робочі органи машини розташовані в один ряд, також відсутній механізм для регулювання робочої глибини.

У основу запропонованої нами корисної моделі покладено завдання шляхом вдосконалення та зміни конструкції відомої машини для обробітку ґрунту з метою досягнення нового технічного результату. Його суть полягає у забезпеченні виконання процесу глибокого обробітку ґрунту шляхом його проколювання та вирізання отворів заданої глибини з подальшим винесенням частини ґрунту на поверхню поля. Також передбачається спрощення конструкції машини та підвищення рівномірності її тягового опору під час роботи.

Поставлене завдання реалізується наступним чином.

У відомому агрегаті для обробітку ґрунту, який складається з рами, з установленим у підшипникових упорах ротором, виконаним із дисків з'єднаних між собою віссю, згідно з удосконаленою корисною моделлю (рис. 2.1), що пропонується, ротор має щонайменше два диски. На кожному з них шарнірно закріплено не менше двох зубів мають складну форму перерізу: у нижній частині у вигляді кільця, у середній — сектор кільця, а у верхній у вигляді круга (рис. 2.2 б). Також у передній частині рами розміщений механізм для регулювання глибини обробітку, який складається з двох опорних коліс із системою (механізмом) вертикального переміщення. При цьому осі шарнірів зубів зміщені під певним кутом на кожному наступному дискові. Цей кут розраховується за кількістю дисків у роторі і кількістю зубів розміщених на одному дискові.

Розглянемо будову такої машини для обробітку ґрунту (рис 2.2 а). Агрегат складаються з рами 1, підшипникових опор 2 і ротора 3. Ротор 3 складаються з віссі та щонайменше двох дисків (в наведеному нами прикладі їх шість), які жорстко з'єднуються з віссю 4. Кожен диск 5 обладнаний опорами 6 та осями шарнірів 7, через які зуби 8 приєднані до диска з можливістю вільного обертання. Вісь зуба 8 у формі циклоїда, утворена при русі ротора по поверхні ґрунту центром осі шарніра 7. Зуби 8 мають трьохсекційну будову з різними перерізами: нижня частина 9 має кільцеподібний переріз, середня частина 10 у вигляді сектора кільця, а верхня частина 11 з перерізом круга (рис. 2.2 б)

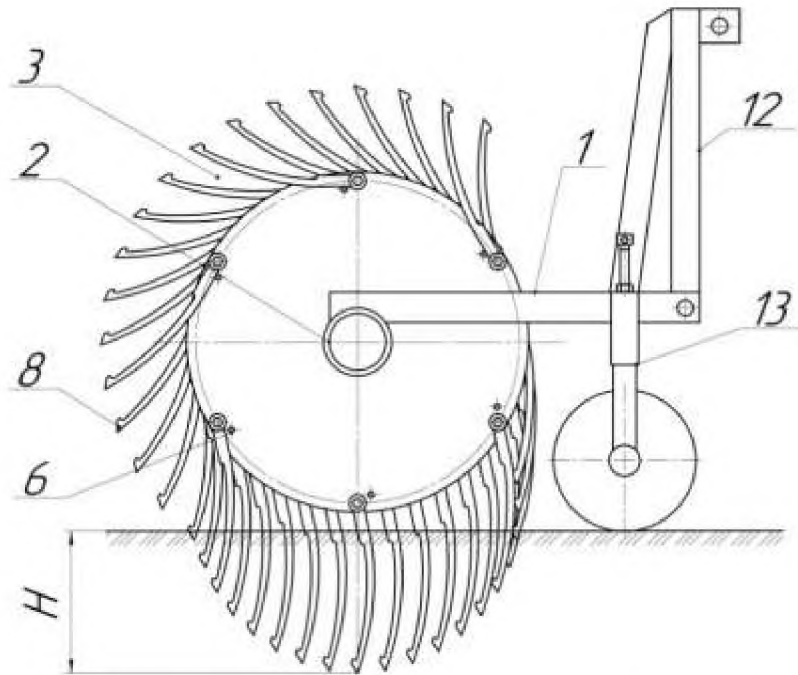


Рисунок 2.1 Схематичне зображення машини для обробітку ґрунту

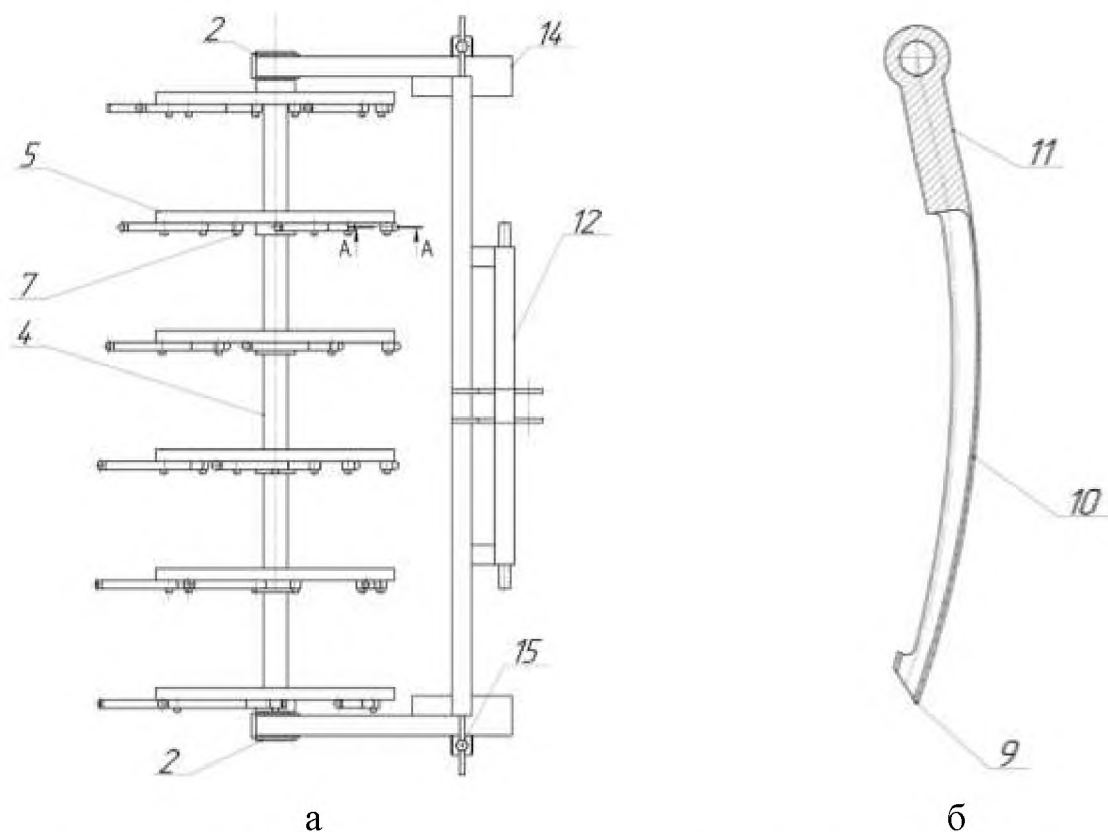


Рисунок. 2.2 а – вигляд зверху машини для обробітку ґрунту, б – переріз
зуба площиною А-А

Забезпечує з'єднання з енергетичним засобом, а також механізм навішування 12 розташований в передній частині рами 1. Там також

знаходиться механізм для регулювання глибини обробітку 13 агрегату. Він включає два опорних колеса 14, які обладнанні гвинтовим механізмом 15, який дозволяє змінювати положення коліс у вертикальній площині. Щоб досягнути рівномірний тяговий опір машини осі шарнірів 7, на яких закріпленні зуби 8, зміщені під деяким кутом на кожному наступному диску. Значення цього кута визначається за кількістю дисків n_d у роторі та кількістю зубів n_z на одному диску, що можна розрахувати за формулою $360^\circ / (n_d + n_z)$.

Агрегат для обробітку ґрунту працює таким чином.

Перед початком роботи з допомогою гвинтового механізму 15 здійснюють вертикальне переміщення опорних коліс 14, встановлюючи необхідну глибину обробітку. Після такої підготовки машину підводять до початку оброблюваної ділянки. Механізм навіски енергетичного засобу спочатку переводять у режим примусового опускання, що забезпечить початкове заглиблення зубів 8 у ґрунт. Далі навіску встановлюють у плаваюча положення, після чого здійснюється рух уздовж заїмки, виконуючи обробіток ґрунту на задану глибину.

Робочий процес машини для обробітку ґрунту відбувається наступним чином. Під дією тягового зусилля енергетичного засобу, яке передається механізмом навішування 12 на раму 1 та підшипникові опори 2, на вісь 4 ротора здійснюється плоский рух дисків 5. Обертання дисків 5 відбувається завдяки парі сил, що виникає під час заглиблення у ґрунт зубів 8 та їх виглиблення, розміщених відповідно з правого та лівого боків від вертикальної осі дисків. У момент в ґрунт нижня частина 9 зуба 8 прорізає отвір, при цьому вирізана маса ґрунту заповнює середню частину 10 зуба. Максимальна глибина обробітку (глибина прорізання) досягається у положенні, коли центр осі шарніра 7 конкретного зуба збігається з вертикальною віссю диска 5, на якому закріплений цей зуб. Завдяки тому, що вісь має форму циклоїда, заглиблення зубів 8 в ґрунту відбувається рівномірно з постійною швидкістю. Під час виходу із ґрунту зуб 8 задньою частиною деформується ґрунт знизу догори та відбувається розпушення ґрунтового шару навколо утвореного отвору. Після повного виглиблення зуб 8 спирається задньою частиною 11 на упори 6 і разом із диском продовжує обертальний рух. Коли зуб досягає положення, у якому

сила його власної ваги створює момент достатній для обертання навколо осі шарніра 7 у напрямку годинникової стрілки, він займе вертикальне положення, необхідне для подальшого заглиблення у поверхню ґрунту. Надалі робочий цикл зуба повторюється за описаним принципом.

Ґрунт, який заповнює внутрішні порожнини нижньої частини 9 та середньої 10 частин зуба 8 під час роботи, піднімається на поверхню поля разом із зубом. Частина цього ґрунту висипається з порожнини одразу після виходу зуба 8 із ґрунту. Остаточне видалення залишків ґрунту з порожнини зуба відбувається під час його обертання навколо осі шарніра 7 в напрямку годинникової стрілки у вертикальне положення, що забезпечується дією інерційних сил. Максимальна глибина обробітку ґрунту, яку може забезпечити машина, обмежується виключно довжиною зуба 8.

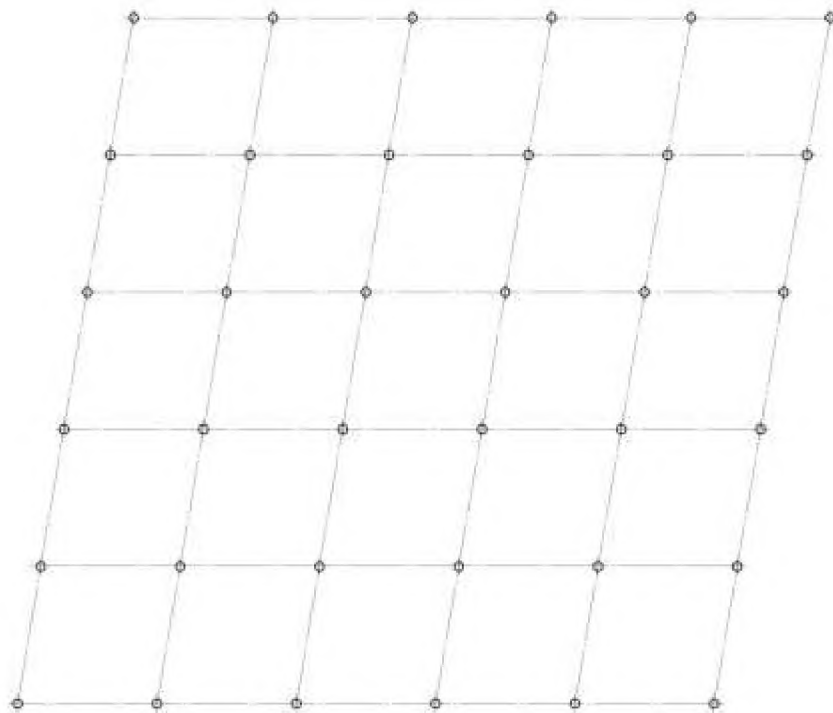


Рисунок 2.3 Схема черговості виконання отворів зубами окремих дисків у ґрунті

Отже, удосконалена конструкція машини для обробітку ґрунту дає змогу формувати в ґрунті отвори, які з часом, під дією природних процесів, сприяють зменшенню щільності нижніх шарів, покращенню їх аерації та наступному руйнуванню плужної підшви. Ґрунт винесений із цих отворів на поверхню, а

також розпушений ґрунт утворений в процесі виглиблення зубів у верхньому шарі ґрунту, створюються сприятливі умови для подальшого висіву сільськогосподарських культур

2.2 Визначення тягового зусилля розроблюваної машини для глибокого розпушення ґрунту.

Згідно з даними наведеними на рис 2.1, робочий орган розроблюваної машини здійснює плаский рух, який можна розглядати як сукупність неперервних обертів навколо миттєвого центру швидкостей. Подібно до плаского руху веденого привідного колеса, обертанню ротора протидіє система пар сил, яка виникає внаслідок опору заглиблення робочих органів та їх підйому. Обертання ротора забезпечується тяговим зусиллям прикладеним до його осі від енергетичного засобу (трактор). Для визначення необхідного тягового зусилля для обробітку ґрунту на задану глибину розглянемо розрахункову схему, представлену на рис. 2.4 [31].

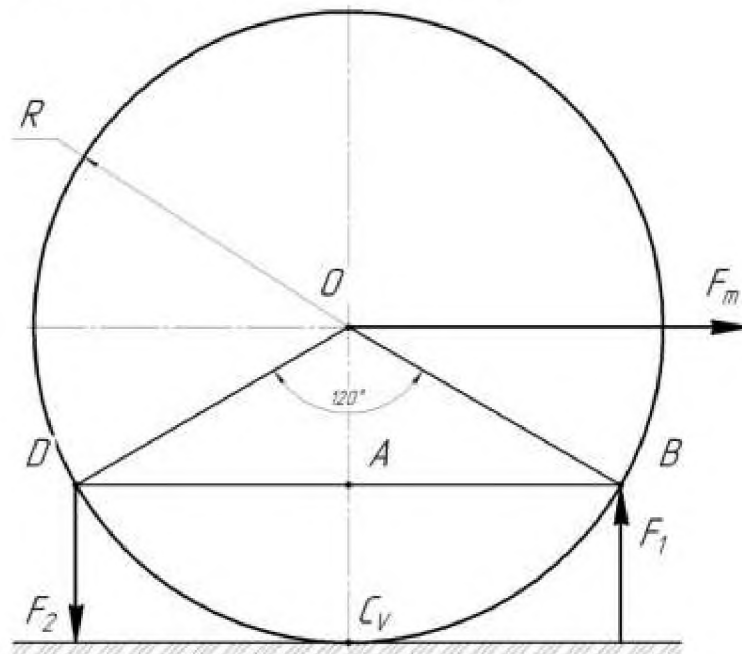


Рисунок 2.4 Схема дії сил на ротор у його пласкому русі

Запишемо умови рівноваги моментів відносно миттєвого центра швидкостей C_V . на основі наведеної схеми [31].

$$\sum_{i=1}^n M_{C_V}(F_i) = F_m \cdot OC_V - F_1 \cdot AB - F_2 \cdot DA = 0 \quad (2.1)$$

де F_m - тягове зусилля трактора необхідне для переборення опору одного диска агрегату, Н;

OC_V – плече моменту сили F_1 відносно точки C_V , м;

F_1 – сила опору проникненню робочих органів у ґрунт, Н;

AB – плече моменту сили F_1 відносно точки C_V , м;

F_2 – сила опору вийманню робочого органу з ґрунту, Н;

DA – плече моменту сили F_2 відносно точки C_V , м;

Із рис. 2.2 видно, що $AB = DA$. Із прямокутного трикутника OAB можна записати

$$\cos \angle OBA = \frac{AB}{OB}. \quad (2.2)$$

Оскільки $OB = R$, а $\angle OBA = 30^\circ$ отримаємо

$$AB = DA = R \cdot \cos 30^\circ, \quad (2.3)$$

Дослідження показують, що твердість ґрунту (опір проникненню конуса деформатора) може досягти $P_{гр}$. Для проектного розрахунку обираємо діаметр робочого органу d . У цьому випадку площа ґрунту, що деформується робочим органом визначатиметься таким чином

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2$$

Відповідно зусилля проникненню робочого органу ґрунтообробного знаряддя складе

$$F_1 = S \times P_{гр}, \text{ Н}$$

Оскільки дослідження зусилля опору вийманню робочого органу з ґрунту не проводилось для проектного розрахунку будемо приймати, що дане зусилля складає 50% від зусилля опору проникнення робочого органу. Тому

$$F_2 = 0,5 \times F_1, \text{ Н}$$

Звернемо увагу на те, що $OC_V = R$ отримаємо

$$F_m = \frac{F_1 \cdot R \cdot \cos 30^\circ + F_2 \cdot R \cdot \cos 30^\circ}{R}, \text{ Н}$$

Для проектного розрахунку приймемо відстань між дисками b м. У такому випадку кількість дисків для вказаної ширини B захвату агрегату складе

$$n = \frac{B}{b}, \text{ шт.}$$

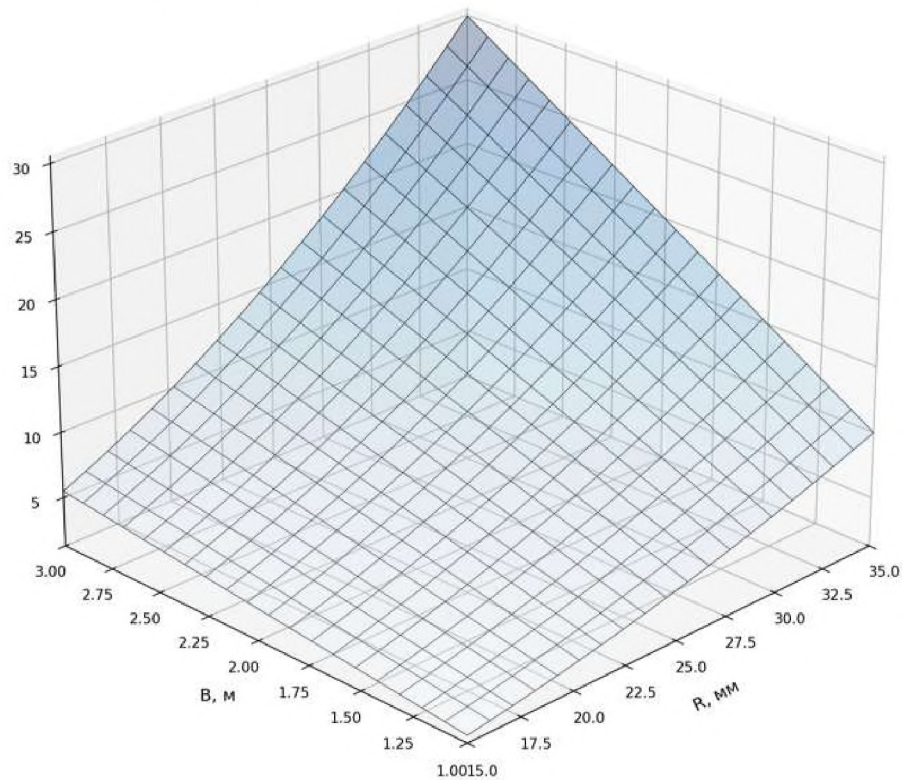
У такому випадку сумарний тяговий опір проектованої машини для глибокого розпушення складе

$$F_{m\Sigma} = F_m \cdot n = \frac{(F_1 \cdot R \cdot \cos 30^\circ) \times 1,5}{R} \cdot \frac{B}{b}, \text{ Н}$$

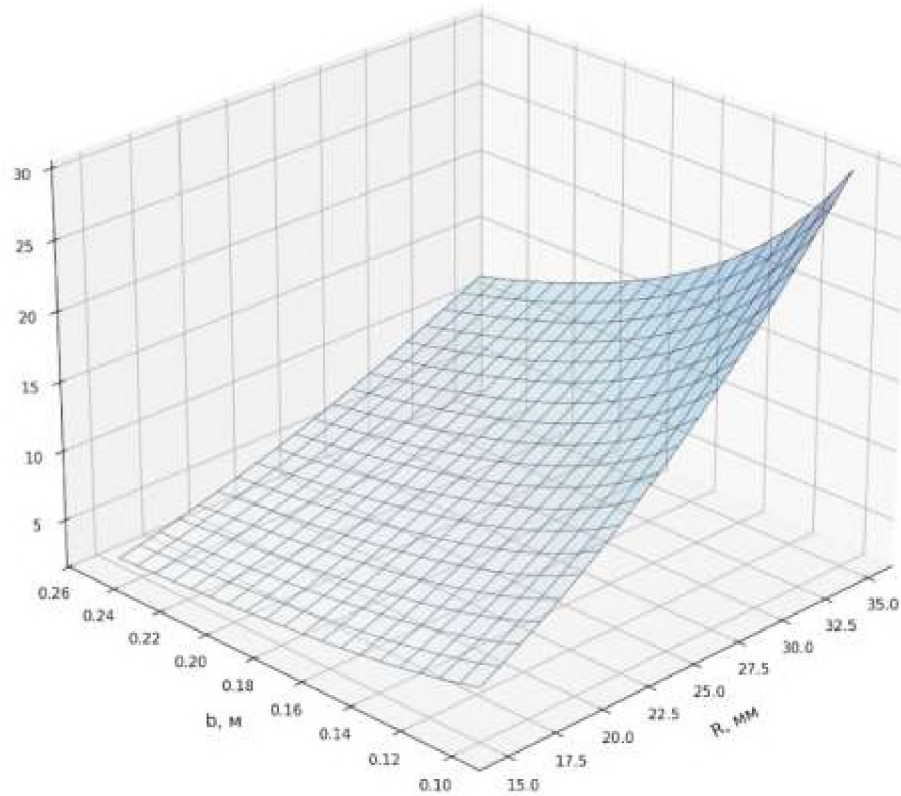
За швидкості виконання операції у v_m затрати потужності N складуть

$$N = F_{m\Sigma} \cdot v_m = F_m \cdot n \cdot v_m = \frac{F_1 \cdot R \cdot \cos 30^\circ + 0,5 \times F_1 \cdot R \cdot \cos 30^\circ}{R} \cdot \frac{B}{b} \cdot v_m = \frac{(S \cdot P_{ep} \cdot R \cdot \cos 30^\circ) \times 1,5}{R} \cdot \frac{B}{b} \cdot v_m, \text{ кВт}$$

Згідно цієї формули розглянемо залежність потужності N від зміни таких параметрів, як радіус ротора R , ширини захвату агрегату B та відстані між дисками ротора b . Отримаємо наступний результат запрограмований на мові Python Google Colab (рис. 2.5).



а



б

Рисунок 2.5 Графік залежності потужності N від радіуса R зуба та ширини B захвату (а), графік залежності потужності N від радіуса зуба R та відстані між дисками b (б)

2.3. Розрахунок конструктивних параметрів машини для глибокого обробітку ґрунту

Було проведено дослідження щільності ґрунту в польових умовах з допомогою електронного приладу щільноміра «ЛАН М-PRO з вбудованою системою GPS. Згідно отриманих результатів вимірювання шар ґрунту з твердістю, що перевищує допустимі межі, найчастіше розташовується на глибині від 25 до 50 см.

Тому доцільним розробляти машину на максимальну глибину обробітку 50 см. Відповідно за таких умов довжина робочого органу та його шарнірного кріплення буде становити близько 60 см, з урахуванням зазору між диском та поверхнею поля.

Загальний діаметр робочого органу приймається 120 см, що забезпечить повне виглиблення диску з ґрунтового шару, при повороті шарнірного з'єднання на $\angle 90^\circ$ від крайнього нижнього положення.

Для спрощення розрахунку приймемо та розглянемо робочий орган з радіусом кривизни, який дорівнює нескінченості. Здійснимо встановлення геометричних розмірів перерізу робочого органу на основі умови стійкості стержня, шарнірно закріпленого на опорі. Розрахункова схема, що відображає закріплення робочого органу проектного знаряддя на початковій стадії його заглиблення у ґрунт, наведена на рис. 2.6 [31].

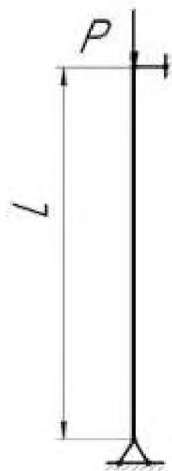


Рисунок 2.6 Схема навантаження робочого органу (зуба)

Обираємо сталь Ст3 для виготовлення зуба. Стискаюче навантаження приймаємо рівним силі опору проникненню робочого органу N . Як зазначалось раніше, поперечний переріз зуба має форму сектора кільця. Зовнішній діаметр приймемо d м. Для визначення геометричних характеристик перерізу використовуємо розрахункову схему, наведеною на рис. 2.7 [31].

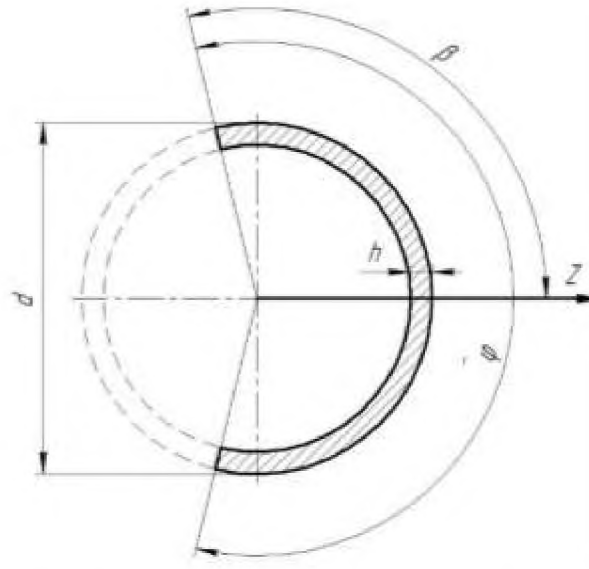


Рисунок 2.7 Схема до розрахунку геометричних характеристик перерізу зуба

За формулою сектора круга встановимо площу поперечного перерізу

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} - \frac{\pi \cdot (d-h)^2}{4} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\varphi}{8} \cdot (2hd - h^2), \quad (2.4)$$

Де φ – центральний кут кільця сектора перерізу зуба, радіани;

h – товщина стінки трубчастого пальця, м.

Використаємо відому формулу для визначення моменту інерції сектора круга

$$J_z = \frac{d^4}{128} \cdot \left[\beta - \alpha - \frac{\sin 2\beta - \sin 2\alpha}{2} \right], \quad (2.5)$$

де α – кут осі від Z до початку сектора круга, який для розглянутого випадку $\alpha=0$;

β – кут від осі Z до кінця сектора круга, який для розглядуваного випадку $\beta = \frac{\varphi}{2}$, радіан

Для розрахунку моменту інерції сектора кільця вважатимемо, що визначатимемо момент інерції сектора круга із центральним отвором діаметром кільця $d-h$. Тоді отримаємо

$$J_z = \frac{d^4}{128} \cdot \left[\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin \varphi}{2} \right] - \frac{(d-h)^4}{128} \cdot \left[\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin \varphi}{2} \right] = \frac{(\varphi - \sin \varphi)}{256} \cdot (d^4 - (d-h)^4). \quad (2.6)$$

Тоді на основі (3.4) та (3.6) отримаємо формулу для радіусу інерції перерізу

$$i = \sqrt{\frac{J_z}{F}} = \sqrt{\frac{(\varphi - \sin\varphi) \cdot (h^4 - (d-h)^4)}{32 \cdot \varphi \cdot (2hd - h^2)}}. \quad (2.7)$$

Для розглянутої схеми закріплення стержня зведена довжина визначатиметься за формулою:

$$l_{зв} = v \cdot L = L, \quad (2.8)$$

де v – коефіцієнт зведення довжини, який в розглянутому випадку $v = 1$ [32]

L – довжина робочого органу (зуба), м.

А гнучкість робочого органу буде становити [31]

$$\lambda = \frac{l_{зв}}{i} = \sqrt{\frac{L^2 \cdot (\varphi - \sin\varphi) \cdot (d^4 - (d-h)^4)}{32 \cdot \varphi \cdot (2hd - h^2)}}. \quad (2.9)$$

Під час дослідження було створено та розроблено три варіанти зубів диска розроблюваної машини різного діаметру зовнішнього діаметру d , товщини стінок, центрального кута кільця сектора перерізу зуба

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

У процесі аналізу та узагальненні інформації з відомих досліджень згідно зазначеної тематики дослідження, було встановлено ключову роль технічної операції глибокого розпушення в системі сучасного землеробства. Зокрема, в численних наукових працях глибоке рихлення є необхідною умовою для ефективного руйнування плужної підшви, розуцільнення, підвищення пористості, поліпшення водного та повітряного режиму ґрунтового шару.

Для вирішення завдання руйнування плужної підшви були створені робочі органи, принцип дії яких полягає у вирізанні в ґрунтовому шарі отворів, з подальшим винесенням ґрунту на поверхню поля. З урахуванням особливостей, структури ґрунтових горизонтів та вимірювань твердості ґрунту агрополігону університету було розроблено три варіанти робочих органів ґрунтообробного знаряддя (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 Варіанти робочих органів розроблюваного ґрунтообробного агрегату

Постає необхідність у проведенні експериментальних та польових досліджень величини зусилля, що затрачається на заглиблення робочих органів у ґрунт. Під час розробки ґрунтообробного знаряддя, визначення цього зусилля

є дуже важливим, оскільки воно безпосередньо впливає енергетичні витрати агрегату, якість формування отворів та надійність роботи розроблюваної машини загалом. Отримані результати дослідження дозволять обґрунтувати оптимальні варіанти робочого органу та сформувавши рекомендації щодо їх подальшого використання та вдосконалення

Для цього була розроблена програма експериментальних та польових досліджень, що передбачає визначення зусиль під час заглиблення робочого органу.

З метою реалізації описаної програми експериментальних досліджень необхідно вирішити такі задачі.

- здійснити підбір лабораторного обладнання та вимірювальної апаратури для проведення дослідження;
- проведення тарування скоби динамометричної, визначення тарувальний коефіцієнт, визначення зусилля, що відповідає одиниці деформації скоби динамометричної
- виміряти поточну твердість ґрунту;
- повести дослідження зусилля, що витрачається під час заглиблення робочого органу у шар ґрунту.

3.2. Лабораторне обладнання, прилади, вимірювальна апаратура, які використовувались в дослідженнях

Для вимірювання та подальшого визначення зусилля, необхідного для виконання отвору ґрунтовому шарі було обрано скобу динамометричну додатково оснащену індикатором переміщення (датчиком зчитувачем) що дозволяє зафіксувати навіть незначні прогини скоби, спричиненні прикладеним навантаженням. Отриманні значення деформації скоби була автоматично передані та зафіксовані на ПК й були записані у таблиці Excel.

Використання такої конструкції є доцільним в межах експериментальних досліджень, оскільки вона дозволяє оперативно встановити та зафіксувати зусилля (навантаження) на робочий орган ґрунтообробного знаряддя в момент

його проникнення в шар ґрунту. На рис. 3.2 представлено фотографію динамометричної скоби з установленим індикатором переміщення, що використовувались під час лабораторних випробувань.



Рисунок 3.2 Скоба динамометрична обладнана індикатором вимірювання переміщення

Для забезпечення точності вимірювань та визначення залежності між деформацією динамометричної скоби та прикладеним зусиллям було проведено її тарування з використанням приладу КПр-1РЭ (рис 3.3). Цей прилад дозволяє прикладати до випробуваного елемента поступово зростаюче зусилля з можливістю його стабільного утримання на кожному рівні навантаження. Ці здатності є ключовими для коректного калібрування вимірювального пристрою, такого як скоба динамометрична.



Рисунок 3.3 Прилад КПр-1РЄ

Основними конструктивними елементами такого приладу є: стіл, навантажувальна підвіска, трос, нижнє коромисло, стяжка, верхнє коромисло, упор, протйвага.

Під час польових випробувань було визначено та здійснено аналіз поточної твердості ґрунту із застосуванням цифрового твердоміра «МОТО-М». (рис. 3.4) Отримані значення твердості були використанні для визначення ступеня ущільнення орного та підорного шарів, виявлення можливих проявів та ознак плужної підшви та уточнення ґрунтових умов, за яких проводилось заглиблення та випробування робочих органів



Рисунок 3.4 Цифровий твердомір «МОТО-М»

Під час експериментальних досліджень як енергетичний засіб було використано трактор ХТЗ-3510 з допомогою його навісної системи створювалось необхідне зусилля для заглиблення в ґрунт виготовлених варіантів робочих органів.

3.3 Методика проведення тарування скоби динамометричної, визначення тарувального коефіцієнта та зусилля, яке відповідає одиниці деформації скоби

Важливим є процес тарування динамометричної скоби для підвищення достовірності результатів експериментального дослідження (рис 3.5) Для цього було застосовано прилад КПр-1РЄ призначений для формування контрольованих навантажень, цей пристрій забезпечить плавне збільшення зусилля на скобу з можливістю його фіксації на кожному етапі випробувань



Рисунок 3.5 Проведення процедури тарування скоби динамометричної з допомогою пристрою КПр-1РЄ

Процедуру тарування виконували за такою послідовністю

1. Підготовка обладнання.

Динамометричну скобу жорстко закріпили на стаціонарному стенді (столу) приладу КПр-1РЄ таким чином, щоб забезпечити можливість прикладення

зусилля вздовж її чутливої осі. Цифровий індикатор переміщення попередньо встановили у нульове положення.

2. Установлення приладу КПр-1РС.

Робочу вилку приладу розміщували таким чином, щоб сила, яка створюється КПр-1РС, прикладалася безпосередньо до чутливої частини скоби. Також необхідно забезпечити співвісність навантажувальної осі пристрою та осі деформації скоби, щоб мінімізувати похибки.

3. Створення контрольованого навантаження.

За допомогою механізму цього приладу поступово прикладали зусилля, збільшуючи на визначені кроки в 30 Н. На кожному рівні навантаження проводили стабілізацію показника, після чого відповідне переміщення фіксувалось цифровим індикатором.

4. Запис та дублювання точок навантаження.

Для кожної точки навантаження виконували не менше трьох повторних вимірювань, що дозволяло виключити вплив випадкових похибок. Дані автоматично вносились в таблицю Excel, що містила значення прикладеної сили за відповідної деформації скоби.

5. Розвантаження скоби динамометричної та перевірка її гістерезису

Після досягнення максимального навантаження динамометричну скобу поступово розвантажували (крок в 30 н), знову фіксуючи показники переміщення. Це дає можливість визначити різницю між показниками деформації скоби під час навантаження і її поступового розвантаження при однакових значеннях прикладеного навантаження (гістерезис), також оцінити пружне відновлення скоби.

6. Визначення тарувального коефіцієнта скоби динамометричної.

Важливим параметром скоби динамометричної є жорсткість пружини. Це величина сили, яку потрібно прикласти, щоб стиснути пружину на одиницю її довжини

Визначимо жорсткість пружини за формулою

$$K = \frac{Q}{\Delta Y},$$

Визначимо середню жорсткість пружини K_{cp} за формуло

$$K_{cp} = \frac{(K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n + K'_1 + K'_2 + K'_3 + \dots + K'_n)}{2n},$$

де $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ – жорсткість пружини при навантаженні;

$K'_1, K'_2, K'_3, \dots, K'_n$ – жорсткість пружини при розвантаженні

n – число ступенів при навантаженні (розвантаженні)

Середня жорсткість пружини буде калібрувальним коефіцієнтом скоби динамометричної, буде дорівнювати

3.4 Методика вимірювання твердості ґрунту з твердоміром «ЛАН-М PRO»

Під час проведення польових випробувань було здійснено визначення та аналіз поточної твердості ґрунту із застосуванням цифрового твердоміра «ЛАН-М PRO» виробництва компанії «МОТО-М». Прилад призначений для вимірювань щільності ґрунту та визначення глибини залягання плужної підшви.

Прилад характеризується простою, але водночас надійною конструкцією. Його електронні компоненти розташовані в вологозахищеному корпусі, виготовленого з ударостійкого пластику, що забезпечує довговічність та стабільність роботи пристрою. Живлення твердоміра здійснюється від вбудованого акумулятора, ресурсу якого достатньо для понад 20 годин безперервного використання.

Твердомір «ЛАН-М PRO» укомплектований двома змінними наконечниками діаметром 1,27 см та 1,91 см. Наконечник з меншим діаметром використовуються на твердих ґрунтах, а з більшим діаметром – на м'яких. Тому такий прилад можна використовувати в різних ґрунтових умовах.

Процес вимірювання твердості повністю автоматизований. Під час польових випробувань необхідно обрати та встановити один з двох тип наконечника згідно агрофізичних якостей ділянки ґрунту. Запустивши твердомір та натиснувши клавішу запуску вимірювання, плавно вводили

прилад у ґрунт. Убудовані датчики фіксують зусилля кожні 2,5 см, а всі показники в режимі реального часу відображаються на цифровому дисплеї.

Твердомір має шкалу вимірювань зусилля, яка складається з трьох діапазонів (рис. 3.6):

- 0-14 кг/см² (0-200 psi) – зелена зона, що відповідає сприятливим умовам для росту рослин;
- 14-21 кг/см² (200-300 psi) – жовта зона, що свідчить про задовільні умови;
- понад 21 кг/см² (300 psi і більше) – червона зона, яка сигналізує про несприятливі, незадовільні умови для росту рослин, пов’язані з наявністю плужної підшви.



Рисунок 3.6 Шкала вимірювань твердоміра «ЛАН-М PRO»

Для підвищення інформативності твердомір додатково подає звуковий сигнал звуковий сигнал в момент входження в зону плужної підшви та при виході з неї. Після завершення вимірювань на дисплеї формується короткий звіт з параметрами підплужної підшви. Також доступний розширений звіт, що містить дані вимірювань через кожні 2,5 см та графік розподілу твердості ґрунту за глибиною [33].

За допомогою такого твердоміра було проведено вимірювання твердості ґрунту (рис.3.7). Перед початком роботи було встановлено наконечник з меншим діаметром 1,27 см призначений для щільних малопористих ґрунтів. Це

дозволить зменшити та мінімізувати опір проникненню, отримати точні вимірювання навіть при підвищеній твердості.



Рисунок 3.7 Вимірювання твердості ґрунту з допомогою твердоміра «ЛАН-М PRO»

Прилад розмістили вертикально до поверхні ґрунту, плавно та рівномірно приклавши зусилля, заглибили твердомір у верхній ґрунтовий шар. Електронні датчики реєстрували величину опору проникнення через кожні 2,5 см глибини. В процесі заглиблення поточні дані відображались в режимі реального часу на дисплеї приладу, що дало змогу побачити зміни твердості з глибиною. Якщо ґрунт характеризується надмірною щільністю понад 21 кг/см^2 , пристрій автоматично переходив червону зону та подавав звуковий сигнал, що вказувало на входження в переущільнений шар (плужну підшву). Після досягнення потрібної глибини або упору обережно витягували твердомір, уникаючи зміщення наконечника, щоб не спотворити дані вимірювань. При завершенні роботи приладу на дисплеї сформували звіт, де зазначались максимальна зафіксована твердість, глибина початку закінчення зони плужної підшви, а також середні показники для досліджуваного шару ґрунту.

Такі вимірювання проводили у декількох контрольних точках агрополігона, що забезпечило можливість просторової оцінки неоднорідності твердості ґрунту. Згідно результату аналізу отриманих даних було визначено критичне переущільнення ґрунту в межах від 25 см до 40 см. Відповідно необхідний ґрунтообробний агрегат, який буде працювати на глибину до 40 см.

Таким чином використання твердоміра «ЛАН-М PRO» забезпечує можливість швидкого та точного визначення фізико-механічних властивостей ґрунту, що необхідно для оцінювання його стану та подальшого обґрунтування параметрів робочих органів агрегату для глибокого розпушення.

3.5 Дослідження зусилля, яке затрачається під час заглиблення робочого органу у шар ґрунту

Експериментальне дослідження було спрямовано на визначення величини зусилля, необхідного для заглиблення виготовлених робочих органів (зубів) розроблюваного ґрунтообробного знаряддя. Конструктивні особливості такого зуба передбачають виконання отворів в ґрунтовому шарі з подальшим винесенням частини ґрунту на поверхню.

Для реалізації досліджень, як енергетичний засіб використовувався трактор ХТЗ-3510, який завдяки своїй масі та потужності забезпечує достатню силу тяги та можливість стабільного навантаження на робочий орган. Заглиблення зуба в ґрунт здійснювалось через навісну систему трактора, що дозволяло передати контрольоване зусилля на дослідний елемент (рис 3.8).



Рисунок 3.8 Процес заглиблення робочого органу у ґрунт з допомогою зусилля прикладеного від навіски трактора

Безпосередня фіксація значення зусилля виконувалась за допомогою скоби динамометричної, обладнаної цифровим індикатором переміщення. Скобу закріплювали між навіскою трактора та виготовленим робочим органом. Попереднє тарування динамометричної скоби з використанням пристрою КПр-1РЄ дало можливість визначити тарувальний коефіцієнт, що дозволило точно перетворити показники переміщення у значення зусилля.

Експеримент проводився на ділянках агрополігону, де попередньо було визначено твердість ґрунту твердоміром «ЛАН-М PRO». Це забезпечило можливість врахувати неоднорідність структури ґрунтового профілю та вплив щільності на величину зусилля під час заглиблення.

У процесі заглиблення робочого індикатор робочого органу індикатор переміщення фіксував величину деформації скоби з кроком, достатнім для фіксування змін зусилля залежно від глибини проникнення. Отримані дані дали змогу оцінити характер зміни опору ґрунту при проникненні зуба, визначили максимальні значення зусилля, необхідні для роботи зубів різних за конструктивними параметрами, а також порівняти їх ефективність.

Результати вимірювань дозволили встановити вплив геометрії зуба на енергетичні витрати, необхідні для проколювання та руйнування ущільнених шарів ґрунту, що є ключовим у подальшому вдосконаленні конструкції та підвищенні її агротехнічної ефективності.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Результати тарування динамометричної скоби та визначення тарувального коефіцієнта

З метою забезпечення точності та достовірності подальших експериментальних вимірювань зусиль, що виникають під час заглиблення розроблених варіантів робочих органів у ґрунт, було проведено тарування (калібрування) динамометричної скоби, обладнаної цифровим індикатором переміщення згідно методики описаної в п. 3.3. Основною задачею цього етапу було визначення залежності між прикладеним зусиллям та деформацією пружного елемента скоби, що дало змогу встановити калібрувальний коефіцієнт для подальших польових досліджень.

Калібрування виконувалось за допомогою приладу КПр-1 РЄ, який забезпечує створення контрольованих поступово зростаючих або спадаючих навантажень. У процесі калібрування до динамометричної скоби послідовно прикладались визначені зусилля з кроком 30 н., а цифровий індикатор фіксував величину деформації пружини Δ , мм. Для кожного рівня навантаження проводились повторні вимірювання з метою виключення випадкових похибок.

Дані, отримані під час калібрування пружини, були систематизовані та внесені до електронної таблиці Excel (табл. 4.1). У таблиці 4.1. відображено значення прикладеної сили N в ньютонах та відповідні їй деформації пружини Δ в міліметрах виміряні в трьох послідовних циклах навантаження скоби. На основі цих даних було розраховано жорсткість пружини k , визначену, як відношення сили до величини деформації для кожного з вимірювань.

Коефіцієнти жорсткості k , визначенні для кожного циклу навантаження, показують мінімальні розбіжності між повторюваними замірами. Відповідно отримані залежності підтверджують лінійну роботу пружини та придатність скоби для точних експериментальних вимірювань.

Результати вимірювання під час калібрування пружини

Сила, N, Н	Деформація пружини, Δ , мм			Коефіцієнт жорсткості, k, Н/мм			середнє
	Цикли навантаження			Цикли навантаження			
	1	2	3	1	2	3	
294,3	5,683	14,578	14,586				
588,6	5,742	14,637	14,642	4988,136	4988,136	5357,143	
882,9	5,799	14,697	14,705	5163,158	4905	4761,905	
1177,2	5,858	14,757	14,764	4988,136	4905	5084,746	
1471,5	5,918	14,816	14,822	4905	4988,136	5172,414	
1765,8	5,979	14,878	14,884	4824,59	4746,774	4838,71	
2060,1	6,039	14,936	14,936	4905	5074,138	5769,231	
				4962,337	4934,531	5164,025	5020,297

Примітка. Розраховано автором самостійно

Згідно з результатами розрахунків середні значення коефіцієнта жорсткості змінюється від 4934 до 5164 Н/мм у діапазоні сил від 294,3 до 2060,1 Н. Узагальнене середнє значення коефіцієнта жорсткості для усіх випробувань становить k_{cp} 5020,297 Н/мм.

Отриманий середній коефіцієнт жорсткості k та надалі був використаний для перерахунку деформацію пружини у фактичні значення зусилля під час проникнення робочих органів в шар ґрунту.

4.2 Результати дослідження твердості ґрунту

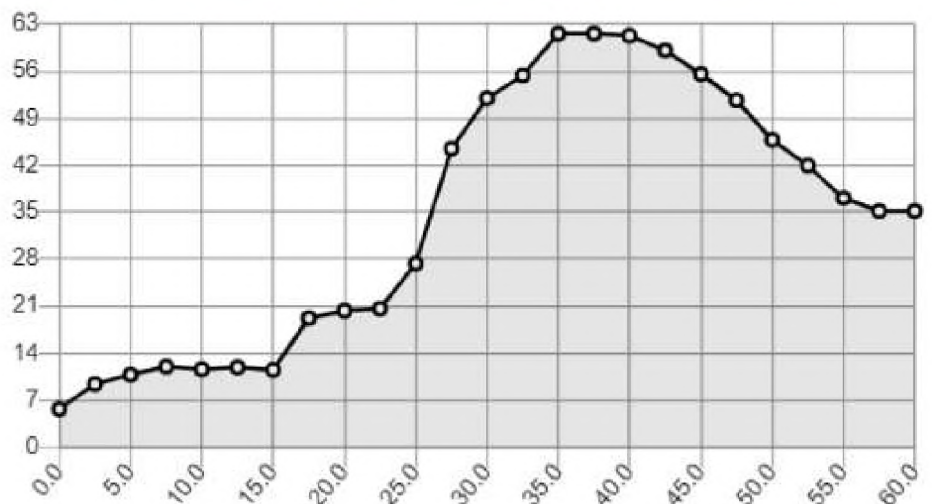
Для оцінки фізико-механічного стану ґрунту перед проведенням експериментальних досліджень з розробленим робочим органом було проведення вимірювання твердості. Відповідно до методики, наведеної у п. 3.4, було виконано дослідження та вимірювання твердості ґрунту в трьох фіксованих точках дослідної ділянки агрополігону кафедри аграрної інженерії ім. проф. Г.А. Хайліса ЛНТУ. Положення цих точок задавались за допомогою додатку Soil Sampler, що забезпечило точне повторення координат під час кожного етапу дослідження.

Польові вимірювання твердості ґрунту було проведено 15 листопада 2025 року з використанням електронного твердоміра «ЛАН-М PRO» з малим наконечником для дослідження щільних ґрунтів. Щоб забезпечити високу точність вимірювань та дозволяє сформувати детальний звіт згідно зафіксованих даних.

Дата/час 15.11.2025
12:16
Широта 50.726376
Довгота 25.297585
Тип наконечника
Малий



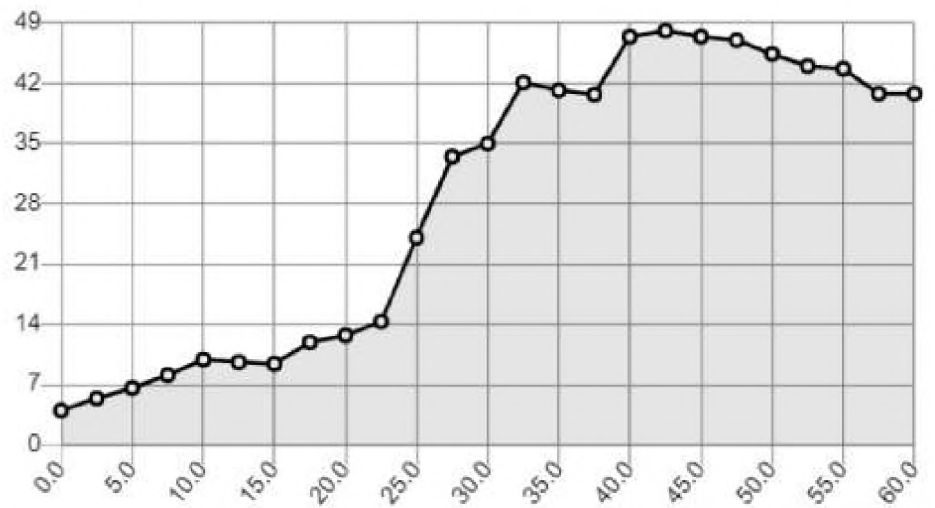
Глибина, см	Зусилля, кг/см ²
0.0	5.7
2.5	9.4
5.0	10.8
7.5	12.0
10.0	11.6
12.5	11.9
15.0	11.5
17.5	19.2
20.0	20.3
22.5	20.6
25.0	27.3
27.5	44.5
30.0	52.0
32.5	55.4
35.0	61.6
37.5	61.6
40.0	61.3
42.5	59.1
45.0	55.6
47.5	51.7
50.0	45.8
52.5	42.0
55.0	37.1
57.5	35.1
60.0	35.1



а

Дата/час 15.11.2025
12:15
Широта 50.726376
Довгота 25.297556
Тип наконечника
Малий

Глибина, см	Зусилля, кг/см ²
0.0	4.0
2.5	5.4
5.0	6.6
7.5	8.1
10.0	9.9
12.5	9.6
15.0	9.4
17.5	11.9
20.0	12.7
22.5	14.3
25.0	24.0
27.5	33.5
30.0	35.0
32.5	42.1
35.0	41.2
37.5	40.7
40.0	47.4
42.5	48.1
45.0	47.4
47.5	47.0
50.0	45.4
52.5	44.0
55.0	43.7
57.5	40.8
60.0	40.8

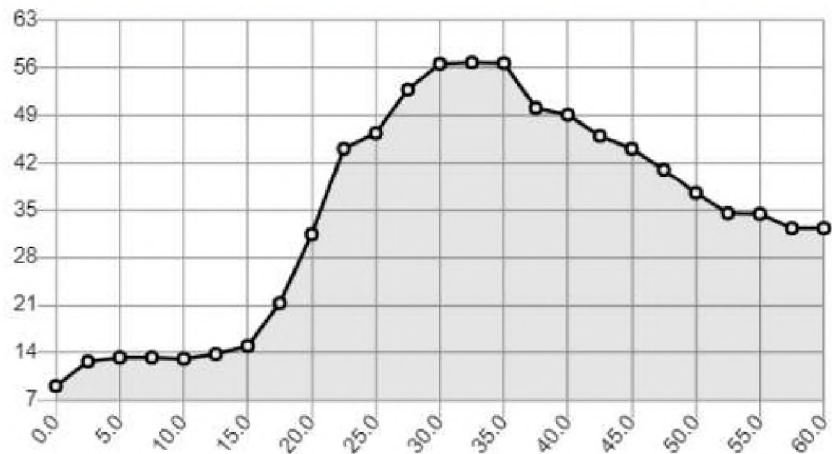


б

Дата/час 15.11.2025
12:13
Широта 50.726448
Довгота 25.297670
Тип наконечника
Малий



Глибина, см	Зусилля, кг/см ²
0.0	9.1
2.5	12.7
5.0	13.3
7.5	13.3
10.0	13.1
12.5	13.8
15.0	15.0
17.5	21.3
20.0	31.4
22.5	44.1
25.0	46.4
27.5	52.8
30.0	56.6
32.5	56.8
35.0	56.7
37.5	50.1
40.0	49.1
42.5	46.0
45.0	44.1
47.5	41.0
50.0	37.5
52.5	34.5
55.0	34.4
57.5	32.3
60.0	32.3



В

Рисунок 4.1 Звіти за результатами вимірювання твердості ґрунту у трьох точках (а, б, в) по середині дослідної ділянки

За результатами та аналізом всіх вимірювань було встановлено, що у верхньому горизонті (0-10 см) твердість збільшувалась від 4 до 13,1 кг/см² та характеризувалась хорошими показниками, що вказує на добре розпушений ґрунт в цій зоні. В перехідній зоні (10-25 см) твердість зростає до 9,6-44,1 кг/см². На глибині 25-45 см спостерігалось різке зростання твердості 24 до 61,6 кг/см², що свідчить про наявність критично переущільненого шару ґрунту, так званої плужної підшви. Саме ця зона є критичною та потребує глибокого розпушення. В глибші шари ґрунту на глибині 45-60 см спостерігалось

зменшення твердості від 35 до 32,3 кг/см² проте показники залишаються підвищеними.

Згідно з результатами дослідження дослідна ділянка характеризувалася неоднорідною структурою ґрунтового профілю, наявністю шару підвищеної щільності, так званої плужної підшви. Отримані дані твердості ґрунту дозволили сформувати об'єктивну вихідну картину механічного стану ґрунтового середовища перед експериментом, що стало базою подальшого аналізу ефективності роботи досліджуваних робочих органів. На далі ці значення були використані при порівнянні зусиль при заглибленні з показниками твердості ґрунту. Результати таких вимірювань стали важливою складовою для обґрунтування конструктивних параметрів розроблюваної машини та її робочої глибин.

4.3 Результати вимірювання зусилля заглиблення робочих органів ґрунтообробного знаряддя

Метою даного етапу експериментальних досліджень було визначення силових параметрів при заглибленні розроблених варіантів робочого органа (зуба) у ґрунт, а також встановлення залежності між глибиною проникнення та величиною прикладеного зусилля.

Експериментальне дослідження проводилось на дослідній ділянці агрополігону кафедри аграрної інженерії ім. проф. Г.А. Хайліса ЛНТУ згідно методики описаної в п. 3.5. Для створення заглиблення використовувався трактор ХТЗ-3510, на кожен з трьох варіантів робочих органів встановлена скоба динамометрична з індикатором переміщення.

Під час проведення вимірювань на кожному кроці заглиблення робочого органа в ґрунт фіксувалося фактична деформація динамометричної скоби, що була записана цифровим індикатором переміщення. Отримані значення деформації автоматично фіксувались в таблиці формату Excel (табл. 4.2). За допомогою калібрувального коефіцієнта отриманого під час тарування скоби на приладі КПр-1 РС значення деформації перераховується у відповідне значення

сили. Для кожної точки вимірювання в таблицю вносились такі дані: глибина заглиблення робочого органу h , коефіцієнт деформації скоби, значення зусилля F .

Таблиця 4.2

Результати вимірювання сили, яке затрачається під час заглиблення робочого органу у шар ґрунту

	глибина заглиблення h , мм	сер	Сила, F , Н	глибина заглиблення h	вел	Сила, F	глибина заглиблення h	малий	Сила, F
1	21,73913	0,164	823,28	31,25	0,241	1209,82	33,33333	0,021	105,42
2	43,47826	0,35	1757	62,5	0,361	1812,22	66,66667	0,045	225,9
3	65,21739	0,595	2986,9	93,75	0,529	2655,58	100	0,157	788,14
4	86,95652	0,6	3012	125	0,806	4046,12	133,3333	0,246	1234,92
5	108,6957	0,571	2866,42	156,25	0,544	2730,88	166,6667	0,336	1686,72
6	130,4348	0,542	2720,84	187,5	0,549	2755,98	200	0,583	2926,66
7	152,1739	0,529	2655,58	218,75	0,727	3649,54	233,3333	0,807	4051,14
8	173,913	0,523	2625,46	250	0,668	3353,36	266,6667	0,706	3544,12
9	195,6522	0,768	3855,36	281,25	0,678	3403,56	300	0,661	3318,22
10	217,3913	0,703	3529,06	312,5	0,642	3222,84	333,3333	0,662	3323,24
11	239,1304	0,438	2198,76	343,75	0,635	3187,7	366,6667	0,687	3448,74
12	260,8696	0,463	2324,26	375	0,626	3142,52	400	0,688	3453,76
13	282,6087	0,671	3368,42	406,25	0,623	3127,46	433,3333	0,641	3217,82
14	304,3478	0,632	3172,64	437,5	0,611	3067,22	466,6667	0,581	2916,62
15	326,087	0,587	2946,74	468,75	0,586	2941,72	500	0,505	2535,1
16	347,8261	0,573	2876,46	500	0,581	2916,62			
17	369,5652	0,557	2796,14						
18	391,3043	0,548	2750,96						
19	413,0435	0,544	2730,88						
20	434,7826	0,541	2715,82						
21	456,5217	0,539	2705,78						
22	478,2609	0,539	2705,78						
23	500	0,542	2720,84						

Примітка. Розраховано автором самостійно

У таблиці 4.2 простежується залежність зусилля від глибини проникнення, що дозволило порівняти роботу різних варіантів робочого органу в однакових

ґрунтових умовах, побачити збільшення навантаження за мірою входження зуба в переущільнену плужну підшву, оперативно виконати аналіз отриманих даних та побудувати графік залежності.

Згідно з результатами розрахунку середнє значення сили для середнього зуба з діаметром 50 мм $F_{ср.ср.}$ становить 2732,41 Н, для великого діаметром 60 мм $F_{ср.вел.}$ – 2951,45 Н, для малого діаметром 40 мм $F_{ср.мал.}$ – 2451,77 Н. Аналіз отриманих даних показав доцільність використання робочих органів з діаметром 40 мм для проведення розпушення в твердих, переущільнених ґрунтах, оскільки затрати енергії будуть найменшими.

На основі отриманих експериментальних даних, попередньо записаних та впорядкованих в таблиці, було побудовано графік залежності зусилля заглиблення робочого органу від глибини його проникнення у ґрунтовий шар (рис. 4.2).

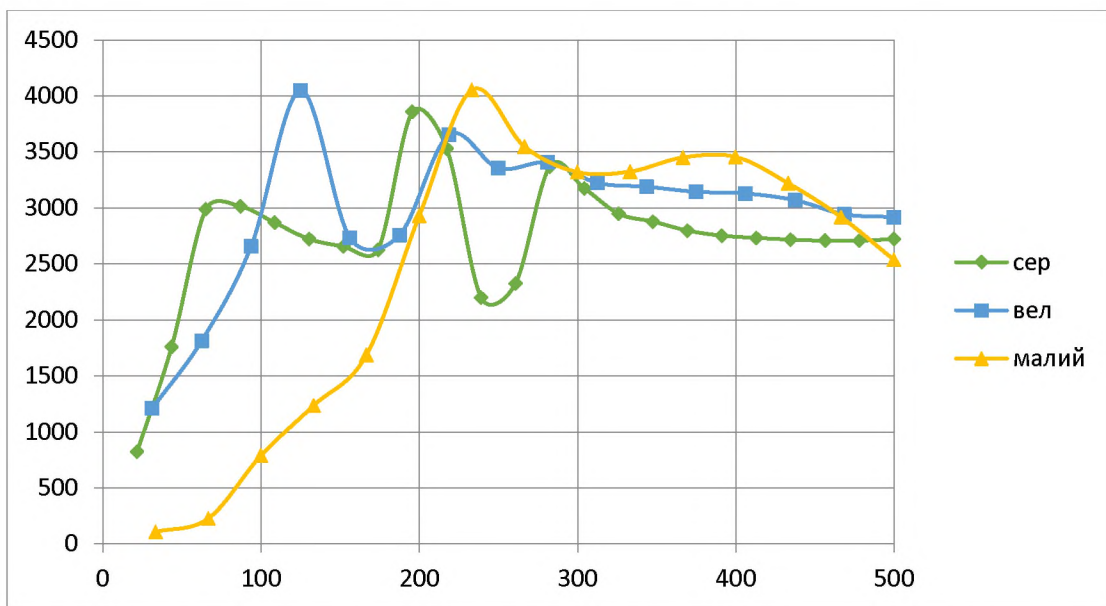


Рисунок 4.2. Графік залежності зусилля заглиблення робочого органу від глибини його проникнення у ґрунтовий шар

Примітка. Побудовано автором самостійно

Результати вимірювань дозволили встановити вплив геометрії зуба на енергетичні витрати, необхідні для проколювання та руйнування ущільнених шарів ґрунту, що є ключовим у подальшому вдосконаленні конструкції та підвищенні її агротехнічної ефективності

ВИСНОВКИ

У процесі кваліфікаційної роботи було проведено комплексне теоретичне та експериментальне дослідження проблеми переущільнення орного і піорного шарів ґрунту, що виникає в наслідок інтенсифікації сучасного сільськогосподарського виробництва та широкого використання важкої сільськогосподарської техніки. Уставлено, що формування плужної підшви значно погіршує агрофізичні властивості ґрунту, знижує його водопроникність та аерацію, обмежує розвиток кореневої системи рослин, та негативно позначається на рівні врожайності сільськогосподарських культур.

Аналіз наукових джерел і результатів власних досліджень підтвердив, що глибоке розпушення ґрунту є одним із найбільш ефективних агротехнічних заходів, спрямованих на руйнування ущільнених горизонтів без обертання ґрунтового пласта. Застосування даного прийому сприяє покращенню структури підорного шару, поліпшенню водно-повітряного режиму, активізації біологічних процесів та процесів мінералізації, створенню сприятливих умов для росту розвитку кореневої системи рослин.

У результаті теоретичних досліджень та обґрунтувань встановлено, що затрати потужності при роботі ґрунтообробної машини при зміні наступних параметрів, таких як радіус ротора, ширина захвату агрегату, відстані між дисками ротора.

У межах експериментальної частини було проведено вимірювання твердості ґрунту на дослідній ділянці, за результати яких було виявлено зони критичного переущільнення на глибинах від 25 см до 45 см, твердість якої сягала від 24 до 61,6 кг/см². Було проаналізовано також інші шари ґрунтового горизонту від 0 до 60 см. Отримані дані обґрунтували необхідність застосування ґрунтообробних агрегатів, здатних ефективно працювати у підорному шарі та забезпечувати руйнування плужної підшви на значній глибині.

Також експериментально встановлено, що середнє значення коефіцієнта жорсткості пружини для усіх випробувань становить k_{cp} 5020,297 Н/мм. Такий коефіцієнт був використаний для перерахунку деформації пружини динамометричної скоби у фактичні значення зусилля під час дослідження робочих органів при заглибленні в ґрунтовий шар.

Особливу увагу приділено дослідженню робочого органа ґрунтообробного агрегату, розробленого відповідно до патенту на корисну модель UA160130U. Було розроблено та виготовлено три варіанти робочих органів (зубів), обґрунтовано їх геометричні параметри. Проведені експериментальні дослідження процесу його заглиблення в ґрунт дозволи встановити характер зміни зусилля при заглибленні залежно від глибини та фізико-механічних властивостей ґрунту. Встановлено середні значення сили для трьох варіантів робочого органа, $F_{cp.cер} = 2732,41$ Н, $F_{cp.вел.} = 2951,45$ Н, $F_{cp.мал.} = 2451,77$ Н. Аналіз результатів експериментального дослідження показав доцільність використання зуба з діаметром 40 мм, оскільки енергетичні затрати будуть найменшими.

Узагальнення результатів досліджень свідчать, що використання удосконаленого ґрунтообробного агрегату для глибокого розпушення створює передумови для зменшення енергетичних витрат, підвищення ефективності обробітку в цілому. Практичне впровадження отриманих результатів може сприяти збереженню та відтворенню родючості ґрунтів, покращенню економічних показників сільськогосподарського виробництва.

Таким чином, результати кваліфікаційної роботи мають, як наукове, так і практичне значення та можуть бути використані при подальшому вдосконаленні ґрунтообробної машини та її робочих органів при впровадженні технологій глибокого розпушення.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Польова О. Вплив біологічно активного ґрунту на його родючість. *Здорова земля України*. 2024. 20 лютого. URL: <https://healthysoil.in.ua/vplyv-biologichno-aktyvnoho-hruntu/>
2. Циліорик О. Дбаємо про родючість ґрунту. *Агрономія Сьогодні*. 2018. 28 вересня. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/11611-dbaemo-pro-rodichist-gruntu.html>
3. Поняття про ґрунт та його родючість. Роль гумусу в родючості ґрунту. 2011. 26 жовтня. URL: <https://tehngaluzi.wordpress.com/2011/10/26/1>
4. Структура ґрунту. *Studfiles*. 2018. 04 листопада. URL: <https://studfile.net/preview/7089026/page:2/>
5. Гассен Д. Родючість ґрунту і живлення рослин. *Агроном*. 2024. 17 листопада. URL: <https://www.agronom.com.ua/rodyuchist-gruntu-i-zhyvlennya-roslyn/>
6. Коваленко І. Побудувати здорову структуру ґрунту. *Агробізнес Сьогодні*. 2020. 14 серпня. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/18429-znyshchennia-ushchilnen-gruntu.html>
7. Циліорик О. Боротьба з переущільненням ґрунтів. *Агрономія Сьогодні*. 2018. 21 серпня. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/11195-borotba-z-pereushchilnenniam-hruntiv.html>
8. Луцюк В.І., Шамралюк О.Л. Агротехнологія: підруч. К.: Літера ЛТД. 2020. 256 с. URL: <https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidrucnyky-posibnyky-profosvita/Litera-Agrotehnologia.pdf>
9. Цицюра Я. Г., Поліщук М. І., Броннікова Л.Ф. Ґрунтознавство з основами геології. Частина II. Генезис, класифікація та властивості ґрунтів: навч. посіб. Вінниця: ТОВ «Друк плюс». 2020. 676 с. URL: <https://repository.vsau.org/getfile.php/25377.pdf>
10. Що таке система обробки ґрунту? Види та особливості. АгроСіті. URL: <https://agrock.com.ua/blog/scho-take-sistema-obrobitku-gruntu-vidi-ta-osoblivosti>
(дата звернення: 15.11.2024)

11. Мінімальна обробка ґрунту (Mini-till). *Словник агронома. SuperAgronom.com.* URL: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/minimalna-obrobka-gruntu-mini-till-id20491> (дата звернення: 15.11.2024)
12. Косолап М.П., Кротінов О.П. Система землеробства No-Till: навч. посіб. Київ. 2011. 372 с. URL: <https://agrosience.com.ua/sites/default/files/library/files/user168/systema-zemlerobstva-no-till.pdf>
13. Система нульового обробітку ґрунту (No-Till). *Словник агронома. SuperAgronom.com.* URL: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/sistema-nulovogo-obrobitku-gruntu-no-till-id20489> (дата звернення: 15.11.2024)
14. Смуговий обробіток ґрунту (Strip-till). *Словник агронома. SuperAgronom.com.* URL: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/smugoviy-obrobitok-gruntu-strip-till-id20490> (дата звернення: 15.11.2024)
15. Макаренко М. Необхідність глибокого розпушування. *Агробізнес Сьогодні.* 2018. 07 червня. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/10504-neobkhdnist-hlybokoho-rozpushuvannia.html>
16. Грицишин М. І., Перепелиця Н. М., Сухина А. Обробіток ґрунту та збереження його родючості. *Пропозиція.* 2024. 01 листопада. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-tekhnika-dlya-obrobitku-gruntu/obrobitok-gruntu-ta-zberezheniya>
17. Глибкорозпушувачі: чизелювання як воно є. *HFagro.* URL: <https://hfagro.com.ua/ua/articles/glubokoryxliteli-cizelevanie-kak-ono-est> (дата звернення 27.02.2025)
18. Rigel. Fixed subsoilers with 2V-shaped chassis. URL: <https://jympa.com/en/productos-jympa/rigel-fixed-subsoilers-with-2v-shaped-chassis/> (дата звернення: 23.11.2024)
19. Бромот І. Глибкорозпушувач. Навіщо він мені потрібен? *Traktorist.ua.* 2019. 30 січня. URL: <https://traktorist.ua/articles/883-glibkoro-zpushuvachi--vse-scho-treba-znati-pro-nih>
20. Лещенко С. М., Сало В. М., Петренко Д. І. Оцінка енергоємності глибокого обробітку ґрунту комбінованими чизельними

- глибокорозпушувачами. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2018. Вип. 31. С. 10-20. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/503288>
21. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І., Васильковський О.М. Вплив конструктивно-технологічних параметрів робочих органів глибокорозпушувача на тяговий опір. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2018. Вип. 48. С. 12-21. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/9804473a-3f3e-449e-83f4-d292aa99981a/content>
22. Шевченко М.С., Десятник Л.М., Шевченко С.М., Муратов А.А. Нове агрофізичне трактування мінімального основного обробітку ґрунту. *Стан і перспективи розробки та впровадження ресурсощадних, енергозберігаючих технологій вирощування сільськогосподарських культур: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 26 лист. 2020 р.)*. Дніпро: ДДАЕУ, 2020. С. 185-188. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/5223/1/%D0%A8%D0%B5%D0%B2%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%9C.%D0%A1.%2C%20%D0%94%D0%B5%D1%81%D1%8F%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%9B.%D0%9C.%2C%20%D0%9C%D1%83%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%B2%20%D0%90.%D0%90.%2C%20%D0%A8%D0%B5%D0%B2%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%A1.%D0%9C..pdf>
23. Деградація ґрунтів: наукові обґрунтування та прогнози. *GrowHow.in.ua* 2021. 29 грудня URL: <https://www.growhow.in.ua/dehradatsiia-gruntiv-naukovi-obgruntuvannia-ta-prohnozy/>
24. Лісова Т.В. Правове забезпечення відновлення земель: теоретичні і практичні проблеми : монографія. Харків: Юрайт, 2020. 396 с. URL: https://dspace.nlu.edu.ua/bitstream/123456789/19501/1/Lisova_mon_22.pdf
25. Як і для чого визначати твердість ґрунту. *Agro-Times*. 2024. 27 березня. URL: <https://agrotimes.ua/agronomiya/yak-i-dlya-chogo-vyznachaty-tverdist-gruntu/>

26. Твердість ґрунту. *Словник Агронома. SuperAgronom.com.* URL: <https://superagronom.com/slovník-agronoma/tverdíst-gruntu-id22754> (дата звернення: 12.01.2025)
27. Гаврилов С. Проблема плужної підшви у ґрунті та шляхи її вирішення. *Пропозиція.* 2017. 24 жовтня. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnolohiyi-vyroshchuvannya/pro-ble-ma-pluzh-noyi-pido-shvy-u-hrunti-ta-shlya-khy-yiyi>
28. Зубко В. М., Комісар Є. О. Аналіз сучасних методів і приладів для вимірювання твердості ґрунту. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.* 2020. № 22. С. 52-63. URL: <https://repo.btu.kharkiv.ua/server/api/core/bitstreams/d74bfd97-8470-4950-b487-cd4ace9380d6/content>
29. Машина для обробітку ґрунту: пат. на корисну модель № 85998 U / Юрчук В.П., Задольський А.М., Грубич М. В., Коваленко С.П. А01В9/00. № u201307071; заяв. 04.06.2013; опуб 10.12.2013, бюл. № 23/2013. URL <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1121337/>
30. Машина для обробітку ґрунту: пат. на корисну модель UA160130U Україна. / Цизь І.Є. Голій В.О. Дідух В.Ф., Цизь Т.П., Попко В.Й. МПК (2025.01) А01В 9/00, А01В 13/08 (2006.01), А01В 13/16 (2006.01), А01В 35/16 (2006.01). № 2025 00537; заяв. 07.02.2025; опуб. 06.08.2025, Бюл.№ 32. URL: <https://iprop-ua.com/inv/pdf/981opn68-pub-description.pdf>
31. Цизь І.Є., Голій В.О., Цизь Т.П., Ковальчук А.П., Пастушок,Б.П. Теоретичне дослідження тягового опору знаряддя для глибокого обробітку ґрунту. *Сільськогосподарські машини.* 2025. Вип. 51. С. 99-106. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1883>
32. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Є.С. Опір матеріалів: підруч. для студ. мех. спец. вищ. навч. закл. К. : Вища школа. 2004. 655 с.
33. Щільномір ґрунту "ЛАН-М". ПП «Науково-виробничий комплекс МОТОМ». URL: <https://motom.com.ua/ua/dopomizhne-obladnannia/240-schilnomir-grynty-lan-m.html> (дата звернення: 29.09.2025)

ДОДАТКИ

Формат	Зона	Лист	Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	При- мітка	
					<u>Документація</u>			
				КАІМГР.17.00.0000	Ротор	1		
					<u>Складальні одиниці</u>			
		1		КАІМГР.01.01.0000	Диск	14		
					<u>Деталі</u>			
		2		КАІМГР.01.00.0001	Кришка корпусу	2		
		3		КАІМГР.01.00.0002	Опора	1		
		4		КАІМГР.01.00.0003	Втулка	1		
		5		КАІМГР.01.00.0004	Підвісь ліва	1		
		6		КАІМГР.01.00.0005	Підвісь права	1		
		7		КАІМГР.01.00.0006	Корпус підшипника	2		
					<u>Стандартні вироби</u>			
					Шплінт ГОСТ397-79			
		8			8×160	2		
					Шайба ГОСТ 11371-78			
		9			14.02.ВСт3	8		
					Болти ГОСТ7798-70			
		10			M8-8d×15	8		
		11			M14-8d×40	4		
		12			M16-8d×120	4		
					КАІМГР.01.00.0000. СК			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Ротор	Лит.	Лист	Листів
Разроб.	Ковальчук					к	1	2
Перев.	Цизь							
Н.контр.	Юхимчук							
Затв.	Хамич							
						ЛНТУ, каф. АІ ім. проф. Г.А. Хайліса, гр. АІМ-21		

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ З УДОСКОНАЛЕННЯМ МАШИНИ ДЛЯ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ЇЙОГО РОЗПУШЕННЯ

МЕТА: Метою роботи є підвищення ефективності процесу глибокого обробітку ґрунту шляхом удосконалення машини для диференційованого розпушення на основі дослідження енергетичних та технологічних параметрів роботи її робочих органів у зонах переущільнення ґрунту.

ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ:

- провести польові випробування робочого органу машини з визначенням енергетичних витрат під час заглиблення та виглиблення зуба;
- оцінити зміну щільності та інших фізико-механічних властивостей ґрунту в зоні дії робочого органу;
- встановити залежність між глибиною розпушення, ступенем ущільнення ґрунту та величиною тягового опору;
- обґрунтувати напрями удосконалення конструкції машини для забезпечення диференційованого обробітку ґрунту з мінімальними енергетичними витратами.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ. Процес глибокого обробітку ґрунту з використанням машин для диференційованого розпушення ущільнених шарів ґрунту.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ. Конструктивні параметри робочих органів ґрунтообробної машини та закономірності їх взаємодії при диференційованому розпушення з ґрунтовим середовищем.

МАШИНИ АНАЛОГИ

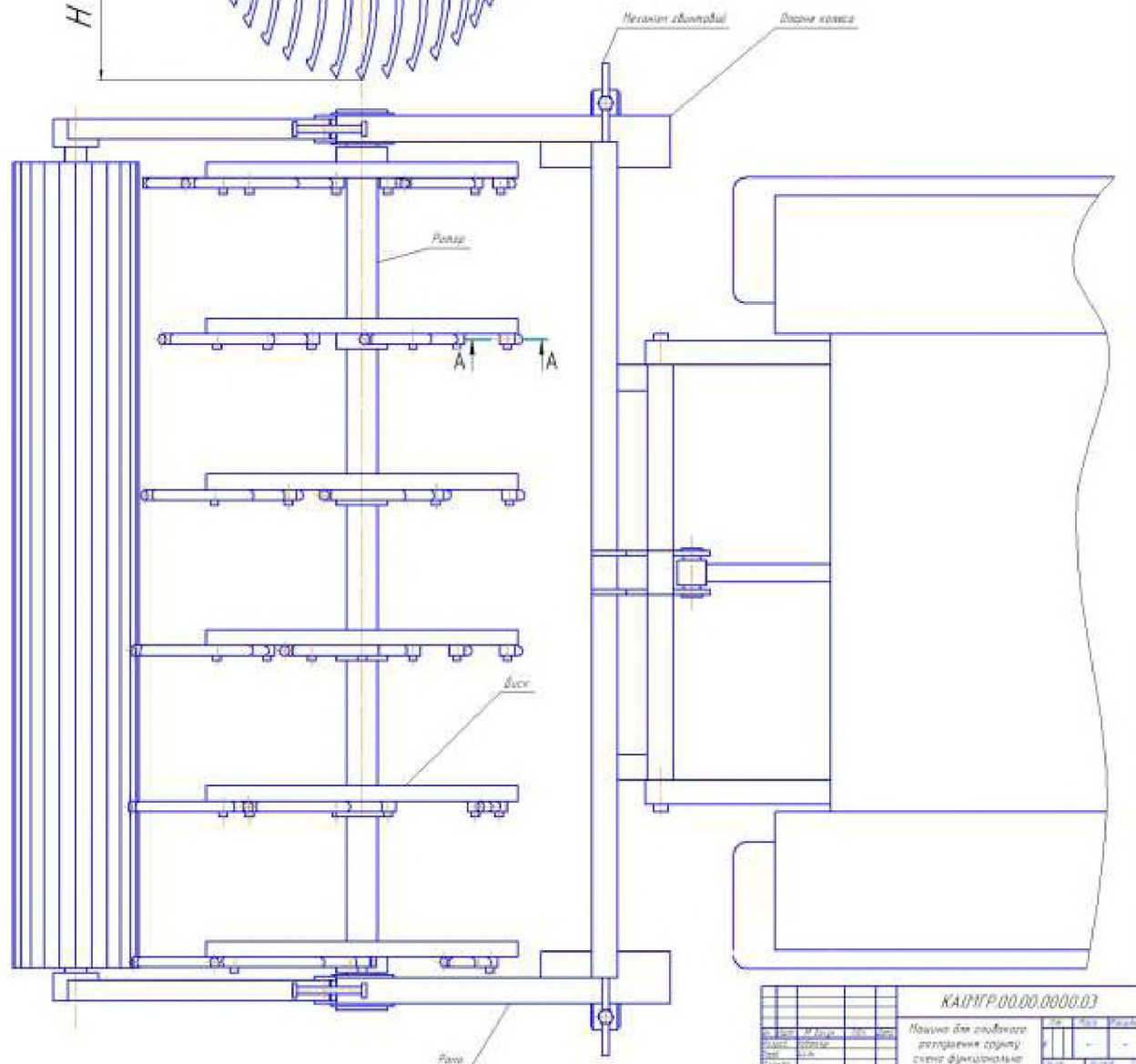
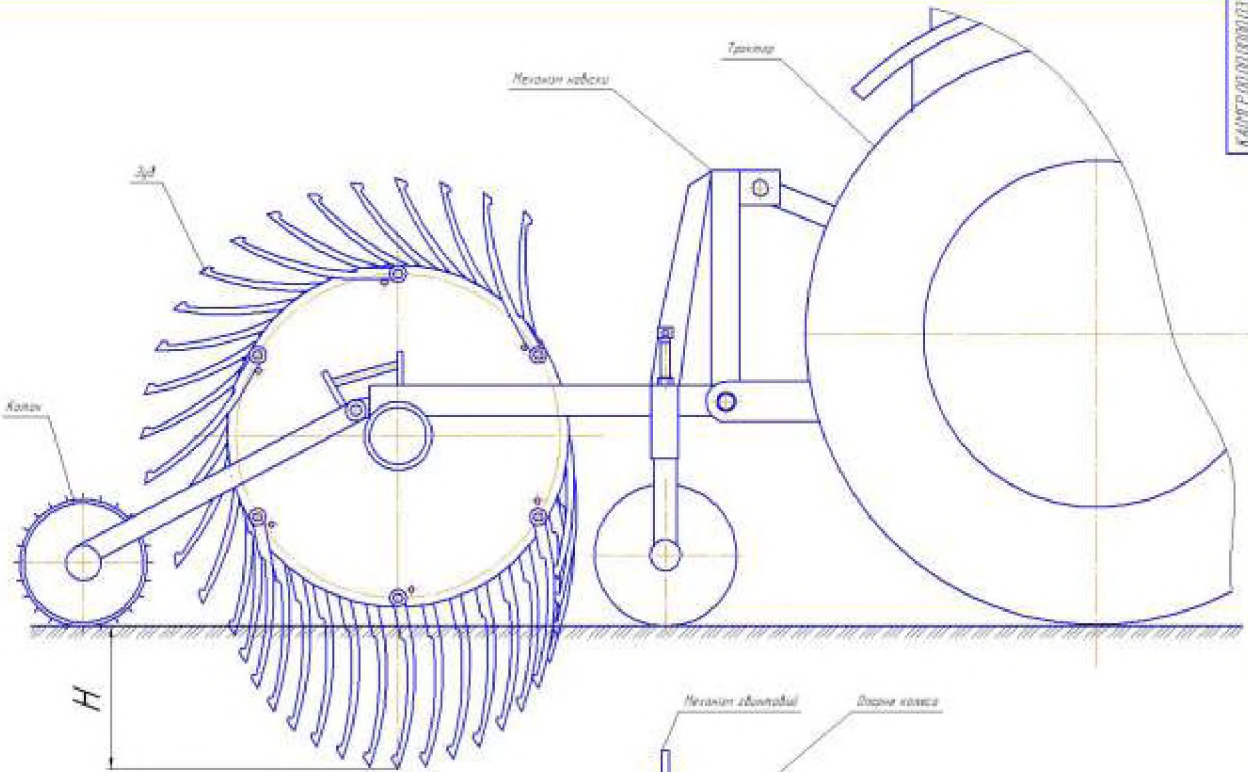


Jympa RIGEL-5-SR50-2V



Dante Ares L

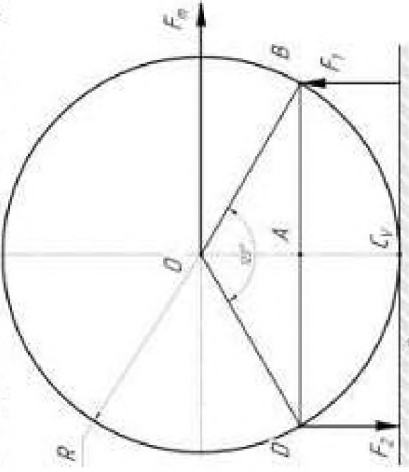
КАИПР.00.00.0000.03



КАИПР.00.00.0000.03			
Исполн.	М.И.Сур.	Инж.	М.И.Сур.
Провер.	С.В.Сур.	Инж.	С.В.Сур.
Дет.	С.В.Сур.	Инж.	С.В.Сур.
Соглас.			
Исполн.	С.В.Сур.	Инж.	С.В.Сур.
Провер.	М.И.Сур.	Инж.	М.И.Сур.
Дет.	М.И.Сур.	Инж.	М.И.Сур.
Машина для отливки различных сорту стена функциональная			
ИЗМ.	№	Дата	Исполн.
ИЗМ. № 1			2019 г. 08.01
Исполн. С.В.Сур.			Инж. С.В.Сур.
Провер. М.И.Сур.			Инж. М.И.Сур.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАТРАТ РОЗРОБЛЮВАНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ГЛИБОКОГО РОЗПУШЕННЯ ҐРУНТУ

Схема дії сил на ротор у його плоскому русі



$$\sum_{i=1}^n M_{C_V}(F_i) = F_m \cdot OC_V - F_1 \cdot AB - F_2 \cdot DA = 0$$

F_m – тягове зусилля трактора необхідне для переборення опору одного диска агрегату, Н;

OC – плече моменту сили F_1 відносно точки C_V , м;

F_1 – сила опору проникненню робочих органів у ґрунт, Н;

AB – плече моменту сили F_1 відносно точки C_V , м;

F_2 – сила опору вийманню робочого органу з ґрунту, Н;

DA – плече моменту сили F_2 відносно точки C_V , м.

$$\cos \angle OBA = \frac{AB}{OB};$$

Оскільки $OB=R$, а $\angle OBA=30^\circ$ отримаємо

$$AB=DA=R \cdot \cos 30^\circ;$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ м}^2$$

S – площа ґрунту, що деформується робочим органом;
 d – діаметр робочого органу.

$$F_1 = S \times P_{гр}, \text{ Н};$$

$P_{гр}$ – твердість ґрунту (опір проникненню конуса деформатора)

$$F_2 = 0,5 \times F_1.$$

$$F_m = \frac{F_1 \cdot R \cdot \cos 30^\circ + F_2 \cdot R \cdot \cos 30^\circ}{R}, \text{ Н}$$

F_m – тяговий опір проєктованої машини.

У такому випадку сумарний тяговий опір проєктованої машини для глибокого розпушення складе

$$F_{m\Sigma} = F_m \cdot n = \frac{(F_1 \cdot R \cdot \cos 30^\circ) \times 1,5 \cdot B}{R} \cdot \frac{1}{b}, \text{ Н}$$

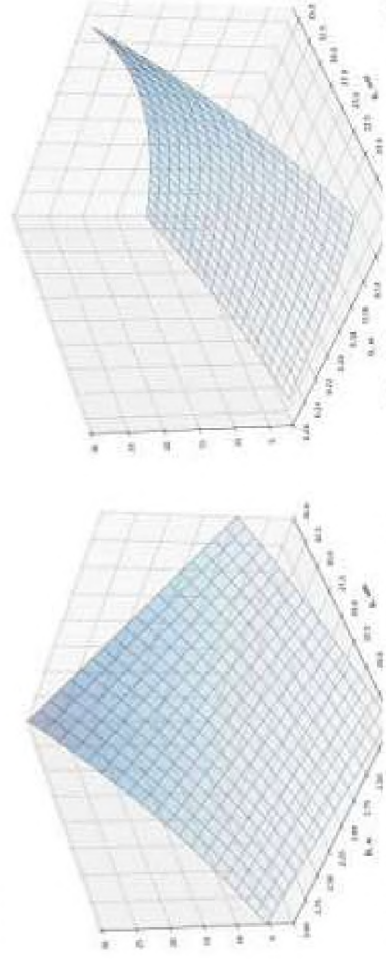
b – відстань між дисками, B – ширина захвату агрегату.

За швидкості виконання операції у U_m затрати потужності N складуть

$$N = F_{m\Sigma} \cdot v_m = F_m \cdot n \cdot v_m = \frac{(S \cdot P_{гр} \cdot R \cdot \cos 30^\circ) \times 1,5 \cdot B}{R} \cdot \frac{1}{b} \cdot v_m, \text{ кВт}$$

Згідно цієї формули розглянемо залежність N від змін R , B та b .

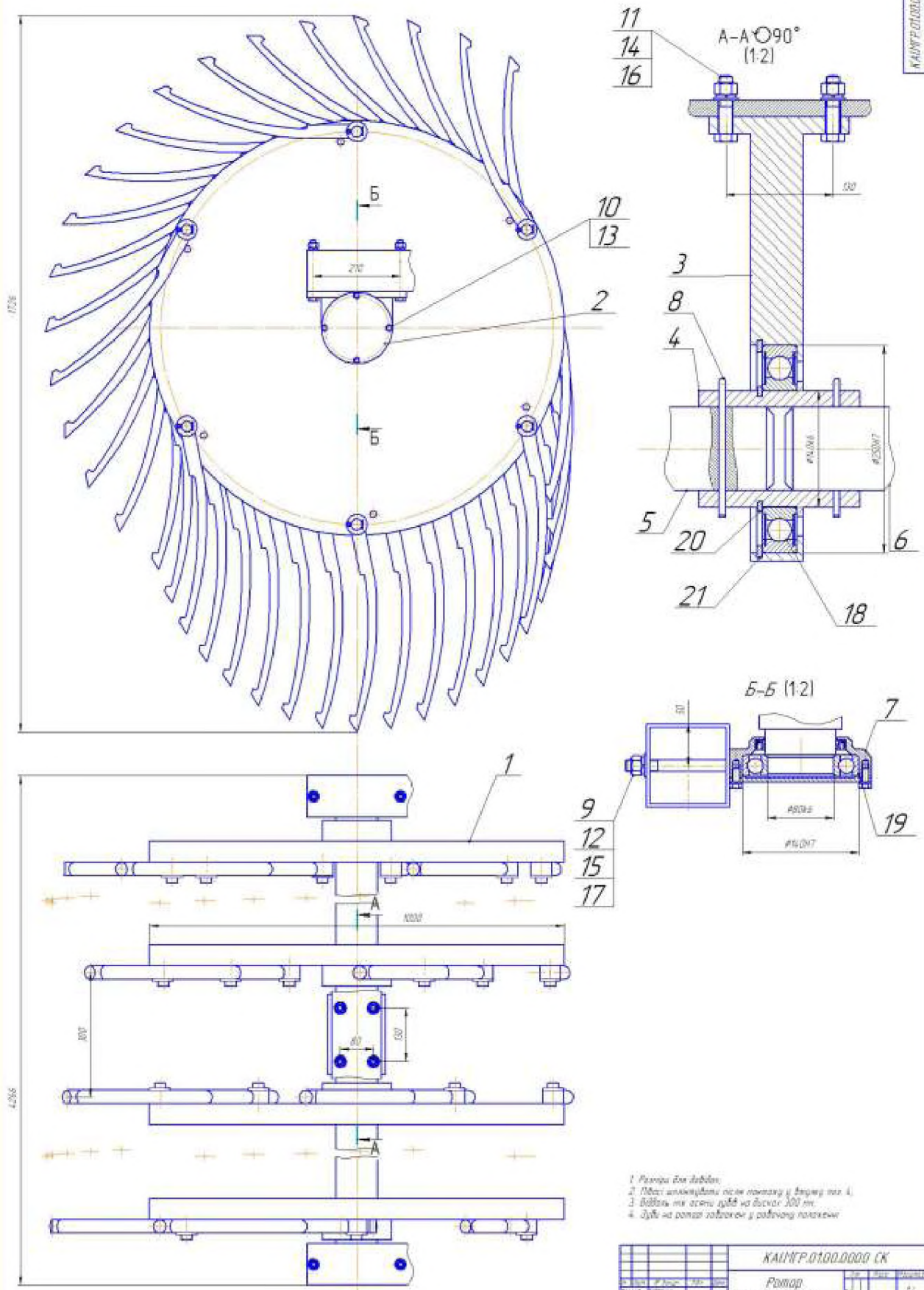
Отримаємо наступний результат запрограмований на мові Python Google Colab



Графік залежності потужності від радіуса зуба та ширини захвату

Графік залежності потужності від радіуса зуба та відстані між

КАИМР.01.00.0000 СК



- 1 - Размеры для доделок
- 2 - Пласти аппроксимации после покатушки в форму по к. 4.
- 3 - Делать так, чтобы губы не достигали 100 мм.
- 4 - Губы на валух должны быть в рабочую полочку

КАИМР.01.00.0000 СК			
Ротор			
крестовина складывающаяся			
№	Изм.	Дата	Исполн.
1	-	14	
1:15, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50, 1:60, 1:70, 1:80, 1:90, 1:100, 1:120, 1:150, 1:200, 1:250, 1:300, 1:400, 1:500, 1:600, 1:700, 1:800, 1:900, 1:1000, 1:1200, 1:1500, 1:2000, 1:2500, 1:3000, 1:4000, 1:5000, 1:6000, 1:7000, 1:8000, 1:9000, 1:10000			

АПАРАТУРА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



Скоба динамометрична обладнана індикатором вимірювання переміщення



Прилад компресійний КПр 1.РЕ



Цифровий твердомір «ЛАН-М PRO»



Фото досліджуваних варіантів робочих органів розроблюваного ґрунтообробного агрегату

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУСИЛЛЯ, ЯКЕ ЗАТРАЧАЄТЬСЯ ПІД ЧАС ЗАГЛИБЛЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ У ШАР ҐРУНТУ



Проведення процедури тарування скоби динамометричної з допомогою пристрою КПр-1РЄ



Вимірювання твердості ґрунту з допомогою твердоміра «ЛАН-М PRO»



Процес заглиблення робочого органу у ґрунт з допомогою зусилля прикладеного від навіски трактора



РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сила, N, Н	Деформація пружини, Δ, мм			Коефіцієнт жорсткості, k, Н/мм			середнє
	Цикли навантаження			Цикли навантаження			
	1	2	3	1	2	3	
294,3	5,683	14,578	14,586				
588,6	5,742	14,637	14,642	4988,136	4988,136	5357,143	
882,9	5,799	14,697	14,705	5163,158	4905	4761,903	
1177,2	5,858	14,757	14,764	4988,136	4905	5084,746	
1471,5	5,918	14,816	14,822	4905	4988,136	5172,414	
1765,8	5,979	14,878	14,884	4824,59	4746,774	4838,71	
2060,1	6,039	14,936	14,936	4905	5074,138	5769,231	
				4962,337	4934,531	5164,025	5020,297

Результати вимірювання під час калібрування

	глибина заглиблення		Сила, F, Н	глибина заглиблення		глибина заглиблення			
	h, мм	мм		h	мм	h	мм		
1	23,78913	0,164	823,28	11,25	0,241	1289,87	33,33333	0,021	105,42
2	43,47826	0,33	1757	62,5	0,161	1882,27	66,66667	0,041	225,9
3	65,21739	0,495	2986,9	93,75	0,229	2633,58	100	0,157	788,24
4	88,99653	0,6	3012	125	0,806	4046,12	133,3333	0,246	1214,92
5	108,8967	0,751	2666,42	156,25	0,144	2736,84	166,6667	0,356	1686,72
6	130,4348	0,942	2720,84	187,5	0,149	2755,98	200	0,581	2916,66
7	152,1739	0,529	2655,38	218,75	0,727	3646,54	233,3333	0,807	4051,34
8	173,913	0,323	2621,48	250	0,688	3373,36	266,6667	0,704	3544,83
9	195,6522	0,768	3833,36	281,25	0,678	3483,56	300	0,601	3518,22
10	217,3913	0,703	3529,26	312,5	0,642	3223,84	333,3333	0,602	3223,24
11	239,1304	0,438	2199,78	343,75	0,631	3187,7	366,6667	0,687	3448,74
12	260,8696	0,463	2324,28	375	0,626	3142,52	400	0,688	3452,78
13	282,6087	0,671	3368,42	406,25	0,623	3127,46	433,3333	0,641	3217,82
14	304,3478	0,652	3172,64	437,5	0,611	3087,22	466,6667	0,581	2916,62
15	326,087	0,387	2940,74	468,75	0,589	2943,72	500	0,503	2532,1
16	347,8261	0,375	2876,46	500	0,341	2968,62			
17	369,5652	0,357	2798,34						
18	391,3043	0,548	2750,98						
19	413,0435	0,544	2730,38						
20	434,7826	0,541	2715,62						
21	456,5217	0,539	2701,78						
22	478,2609	0,539	2705,78						
23	500	0,542	2720,84						

Результати вимірювання сили, яке затрачається під час заглиблення робочих органів у шар ґрунту

Дата/час 10.11.2025
02:10
Широта 50,738176
Довгота 23,297516
Тип координатів
WGS84

Глибина, см	Зусилля, кг/см ²
0,0	0,0
2,5	0,4
5,0	10,0
7,5	12,0
10,0	13,0
12,5	13,0
15,0	13,0
17,5	18,2
20,0	20,2
22,5	26,0
25,0	27,5
27,5	46,5
30,0	52,0
32,5	55,4
35,0	61,8
37,5	61,6
40,0	63,3
42,5	58,1
45,0	52,1
47,5	52,1
50,0	49,8
52,5	49,0
55,0	37,1
57,5	35,1
60,0	35,1



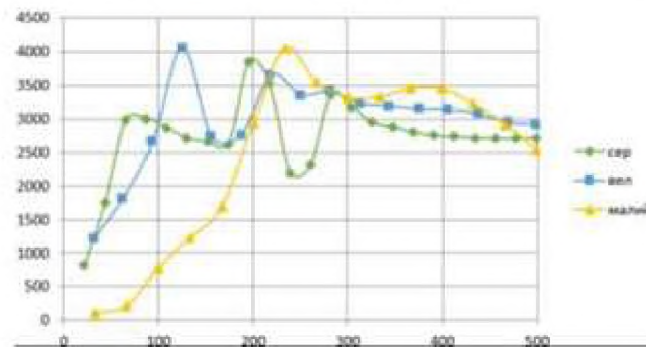
Дата/час 10.11.2025
02:13
Широта 50,738176
Довгота 23,297516
Тип координатів
WGS84

Глибина, см	Зусилля, кг/см ²
0,0	0,0
2,5	0,6
5,0	3,6
7,5	6,1
10,0	7,9
12,5	9,4
15,0	9,4
17,5	11,5
20,0	14,3
22,5	24,2
25,0	33,5
27,5	33,5
30,0	35,1
32,5	35,1
35,0	40,2
37,5	40,2
40,0	45,9
42,5	46,1
45,0	45,0
47,5	45,0
50,0	42,4
52,5	44,4
55,0	43,7
57,5	40,8
60,0	39,8



Дата/час 10.11.2025
02:13
Широта 50,738441
Довгота 23,297670
Тип координатів
WGS84

Глибина, см	Зусилля, кг/см ²
0,0	0,1
2,5	11,7
5,0	13,3
7,5	13,0
10,0	15,1
12,5	15,9
15,0	16,6
17,5	16,6
20,0	16,6
22,5	16,6
25,0	16,6
27,5	16,6
30,0	16,6
32,5	16,6
35,0	16,6
37,5	16,6
40,0	16,6
42,5	16,6
45,0	16,6
47,5	16,6
50,0	16,6
52,5	16,6
55,0	16,6
57,5	16,6
60,0	16,6



Графік залежності зусилля заглиблення робочого органу від глибини його проникнення у ґрунтовий шар