

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра машин та обладнання сільськогосподарського виробництва

Допущений до захисту:
Завідувачка кафедри
д.т.н., професор Веселовська Н.Р.

«_____» _____ 2023 р.

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КАРТОПЛЕЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

Виконав: студент групи 71 ГМ маґ
Гуцал Денис Іванович
Керівник: к.т.н., доцент
Бабин Ігор Анатолійович

2023р.

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра машин та обладнання
сільськогосподарського виробництва

Інженерно-технологічний
факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

зав. кафедри МОСГВ

д.т.н., професор Веселовська Н.Р.

_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУстуденту Гуцалу Денису Івановичу

на тему

«Обґрунтування конструктивних параметрів картоплезбиральної машини»затверджену Наказом від 2 грудня 2022 року № 188 м.

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План-проспект магістерської роботи.
3. Підручники і навчально-методичні посібники, статистичні дані.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТІ).
5. Методика економічної оцінки результатів досліджень.
6. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг стор.	Термін підготовки
Анотація		2	вересень 2023 року
Вступ		1	травень 2023 року
Розділ 1	Стан питання та завдання дослідження	19	лютий -червень 2023 року
Розділ 2	Теоретичні дослідження елеватора з комбінованими прутками картоплезбиральних машин.	22	квітень -серпень 2023 року
Розділ 3	Експериментальні дослідження комбінованих прутків елеватора картоплезбиральних машин.	11	червень- вересень 2023 року
Розділ 4	Полеві дослідження картоплезбиральних машин, оснащених елеватором з комбінованими прутками.	8	Серпень 2023 року
Висновки		1	жовтень 2023 року
Список використаної літератури		3	лютий- жовтень 2023 року

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту « 20 » _____ жовтня _____ 2023 р.

Завдання видано « _____ » _____ 2022 р.

Завдання прийняв до виконання _____ Д.І. Гуцал

Керівник _____ І.А. Бабин, к.т.н., доцент
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Обґрунтування конструктивних параметрів картоплезбиральної машини. Гуцал Д.І. - магістерська кваліфікаційна робота. Кафедра машини та обладнання сільськогосподарського виробництва. Вінниця, 2023.

Пояснювальна записка виконана на 71 аркуші друкованого тексту і містить 4 таблиці, 31 рисунок. При виконанні роботи було використано 31 літературне джерело.

Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел.

У роботі проаналізовано стан технологій збирання картоплі з використанням сучасних картоплезбиральних машин з класичними сепарувальними пристроями. Аналіз результатів досліджень машин показав, що для якісного збирання картоплі, необхідні високопродуктивні та ефективні картоплекопачі і картоплезбиральні комбайни, що будуть в повній мірі викопувати і якісно очищати картопляний ворох, без травмування бульб.

Встановлено, що діаметр ролика сепаратора впливає на величину швидкості центру трубки, раціональним значенням діаметра ролика є значення 0,010 м. Зі збільшенням діаметра трубки комбінованого прутка зменшується швидкість центру трубки, а також зменшується коефіцієнт живого перерізу решета. Тому слід вибирати менше значення діаметра трубки, діаметр трубки 0,0125 м є раціональним. Встановлено, що раціональна довжина трубки комбінованого прутка складає 0,25-0,30 м.

Визначено раціональні конструктивно-режимні параметри пропонованої машини. У ході проведених випробувань встановлено основні її техніко-експлуатаційні показники.

Розроблена методика розрахунку основних параметрів сепарувального робочого органу картоплекопача. Проведені експериментальні-польові випробування картоплекопача з комбінованими прутками сепаратора.

Ключові слова: картоплекопач, елеватор, комбінований пруток, картопля.

ABSTRACT

Justification of the design parameters of the potato harvester. Hutsal D.I. - Master's thesis. Department of machines and equipment of agricultural production. Vinnytsia, 2023.

The explanatory note is made on 71 sheets of printed text and contains 4 tables, 31 figures. 31 literary sources were used in the performance of the work.

The master's thesis consists of an introduction, four sections of the main part, conclusions, and a list of used sources.

The paper analyzes the state of potato harvesting technologies using modern potato harvesting machines with classic separation devices. The analysis of the results of machine research showed that for high-quality harvesting of potatoes, high-performance and efficient potato diggers and potato-harvesting combines are needed, which will fully dig up and qualitatively clean the potato pile, without injuring the tubers.

It was established that the diameter of the separator roller affects the speed of the tube center, the rational value of the roller diameter is 0.010 m. As the diameter of the tube of the combined rod increases, the speed of the tube center decreases, and the coefficient of the live section of the sieve decreases. Therefore, a smaller value of the tube diameter should be chosen, a tube diameter of 0.0125 m is rational. It was established that the rational length of the tube of the combined rod is 0.25-0.30 m.

The rational design and mode parameters of the proposed machine have been determined. In the course of the tests, its main technical and operational indicators were established.

A method of calculating the main parameters of the separating working body of the potato digger has been developed. Experimental field tests of a potato digger with combined separator bars were conducted.

Keywords: potato digger, elevator, combined bar, potatoes.

Зміст

Завдання на магістерську роботу.....	2
Анотація.....	4
Зміст	6
Вступ.....	7
1. Стан питання та завдання дослідження	8
1.1. Сучасні технології виробництва та збирання картоплі в Україні та світі	8
1.2. Фізико-механічні та розмірно-вагові властивості компонентів бульбоносного вороху.	13
1.3. Аналіз схемно-конструктивних рішень пруткових елеваторів картоплезбиральних машин.	17
1.4. Аналіз теоретичних досліджень пруткових елеваторів.	23
2. Теоретичні дослідження елеватора з комбінованими прутками картоплезбиральних машин.	27
2.1. Передумови для вдосконалення елеваторів картоплезбиральних машин.	27
2.2. Перспективна конструктивно-технологічна схема елеватора з комбінованими прутками.	29
2.3. Теоретичні дослідження руху комбінованих прутків елеватора картоплезбиральної машини	30
2.4. Обґрунтування параметрів та режимів роботи елеватора з комбінованими прутками.	40
2.5 Дослідження процесу зіткнення бульб картоплі з комбінованими прутками	44
3. Експериментальні дослідження комбінованих прутків елеватора картоплезбиральних машин.	49
3.1 Програма, методика експериментальних досліджень комбінованих прутків елеватора картоплезбиральних машин.	49
3.2. Результати експериментальних досліджень комбінованих прутків елеватора картоплезбиральних машин.	52
4. Польові дослідження картоплезбиральних машин, оснащених елеватором з комбінованими прутками.	60
4.1. Програма дослідження.	60
4.2. Об'єкт дослідження та обладнання.	60
4.3. Методика дослідження	61
4.4. Результати дослідження	64
Загальні висновки	68
Список використаної літератури	69

Вступ

Однією з причин, що обмежують розвиток вирощування картоплі в фермерських господарствах, є дешевизна основного процесу переробки картоплі, низька матеріально-технічна забезпеченість виробничим обладнанням. Тому, враховуючи найбільш трудомісткий процес збирання картоплі, зрозуміло, що використовувати на невеликій площі високопродуктивний картоплезбиральний комбайн економічно не вигідно. Тому існує нагальна потреба у розробці картоплекопачів, які можуть знизити економічні витрати.

Суттєва частка врожаю картоплі виробляється із застосуванням машинних або механізованих технологій, у тому числі у важких ґрунтово-кліматичних умовах, що призводить до зниження продуктивності та якісних показників роботи застосовуваних збиральних машин (комбайнів та копачів), до підвищення втрат, пошкоджень бульб картоплі та збільшення собівартості виробництва. У більшості схемно-конструктивних рішень картоплезбиральних машин як основний сепаруючий пристрій застосовується прутковий елеватор. При роботі таких елеваторів виникають ударні навантаження, і найчастіше спостерігаються підвищені пошкодження та втрати бульб.

У зв'язку з цим, дослідження впливу параметрів робочих органів картоплезбиральних машин на якісні показники технологічного процесу є актуальним завданням, що має велике значення для народного господарства України.

Метою дослідження є зниження втрат та пошкоджень бульб картоплі шляхом обґрунтування параметрів елеватора з комбінованими прутками.

Об'єкт досліджень - процес роботи елеватора із комбінованими прутками..

Предмет дослідження - теоретичні та експериментальні закономірності процесу взаємодії елеватора, оснащеного комбінованими прутками, з бульбоносним ворохом.

1. Стан питання та завдання дослідження

Огляд та аналіз сучасних технологій виробництва та збирання картоплі в Україні та світі, агротехнічних вимог, що пред'являються до збирання картоплі та роботи картоплезбиральної техніки, фізико-механічних властивостей компонентів картопляного вороху, аналіз конструкцій пруткових елеваторів – необхідні елементи наукового пошуку, що передують та обґрунтовують напрями подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

1.1. Сучасні технології виробництва та збирання картоплі в Україні та світі

Картоплю вирощують у більшості природних зон України. Загальний валовий збір картоплі в країні у 2022 році (дані Держстату) - близько 20 млн т; посівні площі в 2022 році (дані УАВК) - близько 1 млн га; посівні площі в 2023 році (дані УАВК) - близько 880 тис. га.

Вінницька область є одним із багатьох регіонів, де картопля традиційно вирощується. «Вирощування картоплі в будь-яких ґрунтово-кліматичних умовах стає високорентабельним лише за правильного вибору та застосування технології обробітку. Ефективність обробітку картоплі визначають три основні чинники: урожайність культури, якість продукції - вихід товарної фракції та витрати на виробництво» [4].

В даний час для картоплі застосовується кілька основних технологій, кожна з яких має свої особливості [4] (таблиця 1.1).

Заворівська технологія обробітку картоплі передбачає попередню нарізку гребенів для прогріву ґрунту та розташування бульб у верхній частині грядки для збирання комбайнами.

Нарізку гребенів виконують при достатньому вологозабезпеченні на дерново-підзолистих і сірих лісових ґрунтах. Посадка бульб у гребені сприяє розпушенню ґрунту та прискоренню роботи картоплесаджалок. Попередня

нарізка гребенів дає можливість внесення основної дози добрив.

Таблиця 1.1 - Основні особливості технологій обробітку картоплі, що застосовуються в Україні. [4].

Технологія	Ширина міжрядь	Тип ґрунтів	Захист від бур'янів
Заворівська	70 см	Супіщані та легкі суглинки	Механічна
Грядно-стрічкова	110+30 см	Перезволожені або посушливі ґрунти	Механічна та хімічна
Голландська	75 см	Середні та важкі суглинки	Хімічна

Багаторазові міжрядні обробки дозволяють знищувати бур'яни до появи сходів картоплі. Посадка картоплі, у цьому випадку, провадиться відповідно до схеми (рисунок 1.1).

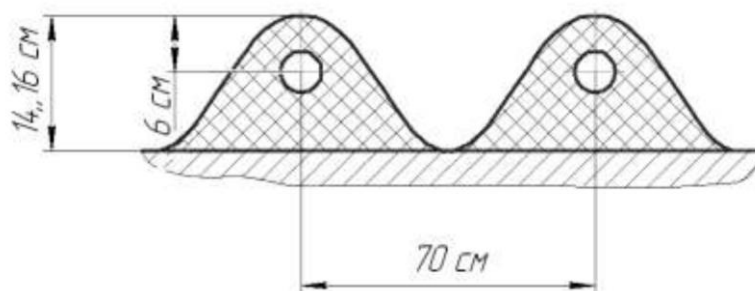


Рисунок 1.1 – Схема посадки картоплі по Заворівській технології

Основним недоліком даної технології є ущільнення колесами ґрунту в міжряддях у процесі міжрядного обробітку та обприскування, що призводить до утворення грудок.

Грядно-стрічкова технологія вирощування картоплі [4] передбачає нарізку об'ємної гряди, яка накопичує весняну вологу, а при перезволоженні вода сходить в борозни. Завдяки універсальності дана технологія застосовується у посушливих та перезволожених умовах, а також за різких змін погоди. Завдяки запасу вологи та зменшення впливу коліс на ґрунт грядно-стрічкова технологія дозволяє підвищити на 10-30% врожайність картоплі порівняно з традиційними технологіями в умовах посухи та підвищеного зволоження [4]. Відсутність

грудок покращує роботу сепарувальних робочих органів, але вимагає переобладнання викопуючих робочих органів.

При збиранні об'ємної гряди з двома рядками на сепаратор комбайна на 30-40% зменшується надходження ґрунту, ніж при традиційній технології [4]. При грядо-стрічковій технології вирощування картоплі, посадку проводять за схемою (рисунок 1.2).

Голландська технологія обробітку картоплі передбачає високу ефективність на суглинних ґрунтах. Основною особливістю даної технології є якісна обробка ґрунту за допомогою вертикально-фрезерних культиваторів на глибину 12...14 см [2].

Посадка картоплі із внесенням невеликих доз мінеральних добрив на глибину близько 6 см. Формування високооб'ємних грядок здійснюється до появи сходів горизонтально-фрезерним культиватором через 5...8 днів після посадки, щоб утримати вологу та виключити пошкодження рослин. Фрезерний гребенеутворювач формує трапецієподібний гребінь за допомогою кожуха гребенеутворювача, створюючи стійку поверхню для поверхневого застосування гербіцидів. Значний об'єм гребеня створює запас вологи, а дощовий період надлишок вологи потрапляє в міжряддя.

Рисунок 1.2 – Схема посадки картоплі за грядо-стрічкової технології
а - загальний вигляд гряд; б - схема посадки за грядо-стрічковою технологією.

Для боротьби з бур'янами до сходів або на сходах застосовують обприскування грядок гербіцидами. Подальший догляд за посадками здійснюють за допомогою обприскувачів. Схема посадки картоплі за голландською технологією показано на рисунку 1.3.

Створення пухкої структури ґрунту в об'ємних грядках сприяє розвитку кореневої системи та можливості збирання картоплі комбайнами. Важливим є попереднє видалення бадилля [3].

Аналіз технологій обробітку картоплі у Вінницькій області показав, що найбільш переважними є грядо-стрічкова та голландська технології. Слід зазначити, що в даний час існує система машин лише для Голландської технології з міжряддями 75 см [3]. Для грядо-стрічкової технології необхідно створення відповідних машин чи адаптація вже існуючих. У зв'язку з викладеним, необхідне створення універсальних робочих органів здатних працювати у широкому діапазоні умов, як і посушливих, і умовах підвищеної вологості.

Рисунок 1.3 - Схема посадки за голландською технологією
а – формування гребенів; б - сформовані об'ємні грядки

До картоплезбиральної техніки і до процесу механізованого збирання картоплі пред'являються досить суворі агротехнічні вимоги.

Так, картоплезбиральні комбайни і копачі повинні відповідати наступним основним агротехнічним вимогам [3]:

- робочі органи комбайна, що підкопують, повинні бути добре пристосовані до мікрорельєфу поля і забезпечувати рівномірну глибину ходу при різних заглибленнях. Відхилення глибини ходу лемешів від встановленого значення допускається трохи більше ± 2 див;

- забезпечувати викопування бульб із глибини до 22 см при ширині бульбових гнізд 40 см;

- витягувати на поверхню поля не менше 95% врожаю бульб;

- допускаються пошкодження не більше 3% бульб по масі;

- комбайн повинен збирати у бункер не менше 97% урожаю картоплі;

- втрати всіх видів не повинні перевищувати 3%;

- чистота картоплі в тарі повинна бути не менше 80%;

- при роботі комбайна на легких, середніх та засмічених камінням ґрунтах пошкодження бульб не повинні перевищувати 10 %, а на перезволожених важких ґрунтах до 5 %» [3].

Важливими факторами, що також сильно впливають на пошкодження бульб, і на якість продукції, є правильна організація транспортування врожаю з поля до місць переробки або зберігання, а також технічний стан збиральних машин та машинно-тракторних агрегатів.

Тільки суворе виконання вищезазначених вимог гарантує дотримання вимог споживача до продукції картоплярства, що поставляється сільськогосподарським товаровиробником, а отже, і найбільшого ефекту від виробництва картоплі, з урахуванням продуктивності сортів у конкретних умовах господарств [4].

Таким чином, найбільш перспективною на даний момент є голландська технологія вирощування картоплі, яка переважно застосовується в Україні, в умовах застосування машинних і механізованих технологій. При цьому

вітчизняна картоплезбиральна техніка, спроектована з урахуванням ширини міжрядь 70 см, легко може застосовуватися на 75 сантиметрових міжряддях в рамках голландської технології практично без, або з мінімальними конструктивними змінами. Слід зазначити, що підвищення фактичної врожайності та найбільш повна реалізація біологічних можливостей культури можливі лише за суворого дотримання агротехнічних вимог на збирання, що не завжди можливе (насамперед через стислий термін збирання).

Тут найважливішим фактором стає ефективність робочих органів машин, які забезпечують розширення діапазону умов використання та забезпечення високих вимог до рівня пошкоджень та втрат бульб, а також чистоти бульб у тарі.

1.2. Фізико-механічні та розмірно-вагові властивості компонентів бульбоносного вороху.

Ефективність збирання (а отже, і обробітку в цілому) багато в чому визначається погодними, кліматичними, ґрунтовими, виробничими умовами, а також біологічними особливостями культури картоплі. Ці умови, по суті, формують основні характеристики компонентів картопляного вороху, які надходять на сепаруючі робочі органи машини при збиранні, а також їх співвідношення у воросі. Картопляний ворох включає ґрунт, рослинні залишки, бульби, каміння (при наявності). Властивості компонентів вороху, як сказано вище, значною мірою визначаються погодними умовами, попередніми культурами і внесенням добрив. У той же час сепарація ґрунту на пруткових елеваторах визначається в першу чергу механічним складом, вологістю ґрунту та наявністю грудок та каміння [4].

Ущільнення ґрунту та утворення ґрунтових грудок відбувається за рахунок руйнування та зближення структурних агрегатів ґрунту під дією зовнішнього навантаження. В результаті багаторазових міжрядних обробіток відбувається витіснення повітря та води з, що зменшує об'єм та викликає деформацію частинок ґрунту[3]. Повторення деформацій призводить до

зміщення частини агрегатів та заклинювання частинок ґрунту в нестійкому положенні. Багаторазові дії зовнішнього навантаження при частковому відновленні ґрунтових агрегатів після деформації призводять до найбільшого ступеня ущільнення ґрунту [4].

Руйнування ґрунтових агрегатів і грудок визначається не тільки вологістю та механічним складом ґрунту, а й способом деформації ґрунту. Дослідження розриву, стиснення, зсуву та вигину ґрунтового вороху, проведені Жуком Я.М. дозволили встановити величини тимчасового опору глинистого чорнозему за різної вологості (таблиця 1.2). Встановлено, що вид деформації значною мірою визначає величину тимчасового опору ґрунту руйнуванню. Найбільшого зусилля руйнування ґрунту вимагає деформація стиснення, а найменшого зусилля – деформація розтягування (розриву). За даними Г.М. Синьоокова більшість суглинистих ґрунтів деформуються шляхом відриву. Це показує, що для підвищення ефективності руйнування ґрунту необхідно використовувати принципи розриву з вигином бульбоносного вороху при роботі сепарувальних органів картоплезбиральних машин [4].

У процесі роботи картоплезбиральних машин бульби взаємодіють із робочими органами, що призводить до пошкоджень структури бульби. Бульби зазнають безліч статичних і динамічних навантажень, в результаті яких знижується пружність тканин, руйнуються міжклітинні зв'язки, порушується цілісність клітин [4].

Таблиця 1.2 – Тимчасовий опір розриву, стиску, зсуву та вигину глинистого чорнозему в польових умовах

Розрив		Стискання		Зсув		Вигин	
Вологість ґрунту в %	Середній тимчасовий опір в г/см ²	Вологість ґрунту в %	Середній тимчасовий опір в г/см ²	Вологість ґрунту в %	Середній тимчасовий опір в г/см ²	Вологість ґрунту в %	Середній тимчасовий опір в г/см ²
21-23	61,8	12-16	1080	15-17	122,1	15-17	488
23-25	52,5	19-22	980	20-24	98,6	-	-
26-28	50,0	22-24	650	-	-	-	-

Вивченням пошкоджень бульб картоплі під час викопування і сепарувальних операцій займались значна кількість науковців. Дослідженнями J. Mitrus встановлено, що пошкодження залежить від маси бульб. Мінімум пошкоджень при комбайновому збиранні картоплі спостерігається при середній масі бульб 50-80 г. При ранньому збиранні за рахунок високої еластичності бульб зменшується обсяг внутрішніх пошкоджень (потемніння м'якоті), водночас збільшується обдирання шкірки з поверхні бульби. Відомо, що збирання при температурах нижче 50 С значно збільшує пошкодження [7]. Недостатня міцність шкірки при збиранні ранні терміни призводить до збільшення пошкоджень бульб. На ймовірність пошкодження картоплі важливий вплив має форма бульби. Дослідженнями Головіцина С.К. встановлено, «що зусилля роздавлювання залежить від напрямку навантаження, що додається: найменше зусилля спостерігається при орієнтації навантаження за довжиною бульби (720-817 Н), середнє зусилля спостерігається за шириною (780-827 Н) та максимальне – за товщиною (853-895 Н), що виявлено на прикладі сорту «Лорх»». [7].

Головним фактором, що знижує пошкодження бульб, є площа контакту бульби з поверхнями робочих органів. Інтенсивний динамічний вплив сепарувальних робочих органів на картопляний ворох покращує сепарацію ґрунту, але збільшує пошкодження бульб за рахунок 21...48 зіткнень на робочих органах картоплезбиральних комбайнів [7]. Очевидно, що характеристики цих зіткнень безпосередньо впливають на пошкодження бульб і можливість їх подальшого тривалого зберігання або використання в харчовому виробництві (наприклад, для виготовлення чіпсів).

Дослідженнями E. Spiess встановлено, що зі збільшенням частоти та амплітуди струшування полотна елеватора зростають пошкодження бульб. Іншими авторами встановлено, що при збільшенні швидкості елеватора та зменшенні надходження ґрунту пошкодження бульб зростають.

Стан ґрунту на момент збирання також суттєво впливає на пошкодження бульб. Дослідженнями I. Brecka, B. Hanovsek, C.L. Paterson та E. Spiess

встановлено високий кореляційний зв'язок між пошкодженнями бульб і станом ґрунту. Доведено вплив ґрунтового прошарку на пошкодження бульб картоплі картоплезбиральними машинами. Виявлено протиріччя – зменшення домішок ґрунту у бункері призводить до збільшення пошкоджень бульб.

Очевидно, що пошкодження картоплі визначаються площею контакту бульби з прутками се парувального елеватора. Зменшення контактної напруги при взаємодії знижує пошкодження бульб.

Вивчаючи пошкодження бульб В.С. Митрофанов встановив, що пошкодження бульб залежить від енергії удару, великі бульби ушкоджуються навіть при падінні з невеликої висоти, тоді як середні та дрібні залишаються непошкодженими. Також повторні удари збільшують пошкодження бульб, особливо під час взаємодії з металевими поверхнями. Також, пошкодження бульб спостерігаються на прутковій поверхні (метал), багато авторів пропонували з метою зниження пошкоджень використовувати різні неметалеві матеріали (гуму, шармаси, композити) для виготовлення контактних поверхонь. Відзначено, що найбільш небезпечними є внутрішні пошкодження, які важко відокремити від інших бульб, і при тривалому зберіганні вони є осередками псування картоплі.

Способи контролю пошкоджених бульб можна розділити на руйнівні та неруйнівні. При першому способі проби бульб для дослідження розрізаються на часточки. При другому способі бульби зберігають цілісність та якість бульб оцінюється спеціальними методами та дозволяє автоматизувати процеси сортування [7].

Пошкоджена картопля, що має забиття м'якоті за період зберігання, втрачає суху речовину – до 5%. Пошкоджені бульби під час зберігання збільшують інтенсивність дихання на 10%, а тепловиділення – на 40%. Для визначення пошкоджень картоплі при випробуваннях картоплезбиральних машин застосовується загальноприйнята методика, розроблена професором Н.І. Верещагіним [7].

Таким чином, для підвищення збереження картоплі необхідно знижувати

пошкодження бульб у період збирання. Це можливо на основі застосування нових матеріалів та підходів до конструювання сепарувальних робочих органів. Багато дослідників відзначають підвищені пошкодження бульб на поверхні пруткових елеваторів, причому проблема потребує подальшого вивчення.

1.3. Аналіз схемно-конструктивних рішень пруткових елеваторів картоплезбиральних машин.

Основна робота з сепарації ґрунту в картоплезбиральних (а також, в коренезбиральних) машинах відбувається на сепарувальних елеваторах. Сепарувальні елеватори відокремлюють картоплю з бульбоносного вороху, що включає 95,5 - 98,5% ґрунту; 1 - 4% бульб та 0,5-1,5% рослинних домішок. Збирання картоплі здійснюють картоплезбиральними комбайнами, наприклад, AVR-220B, AVR-6200, AVR-«Престиж» («Колнаг»), DR-1500 і BR-150, SE-75 і SE-150 («Грімме») та іншими, а також картоплекопачами Л-652, КСТ-1,4, КТН-2В. Всі існуючі картоплезбиральні машини сконструйовані в результаті поєднання набору сепарувальних та допоміжних органів та прийомів сепарації. Здебільшого механічні подільники у яких – це пруткові елеватори [8].

Класифікацію сепарувальних робочих органів картоплезбиральних машин, зокрема елеваторів, наведено рисунку 1.4 [8]. «У картоплезбиральних машинах в основному застосовуються робочі органи, які здійснюють просівну сепарацію, які у свою чергу можна підрозділити на транспортуючі, ротаційні та відцентрові» [8].

За принципом поділу компонентів з точки зору підходу до видалення домішок з картоплезбиральної машини сепарувальні робочі органи, бувають трьох видів: «що здійснюють просівну сепарацію; які здійснюють виносну сепарацію; комбіновані» [8].

На більшості картоплезбиральних машин застосовуються пруткові елеватори з гнучкими тяговими ременями. В останні роки у пруткових елеваторах використовуються зубчасті ремені із зубчастими барабанами на

приводних валах. Елеватори, що сепарують, в оптимальних умовах добре просіюють ґрунт (до 80...92%), і транспортують бульбоносний ворох практично без пошкоджень бульб [8].

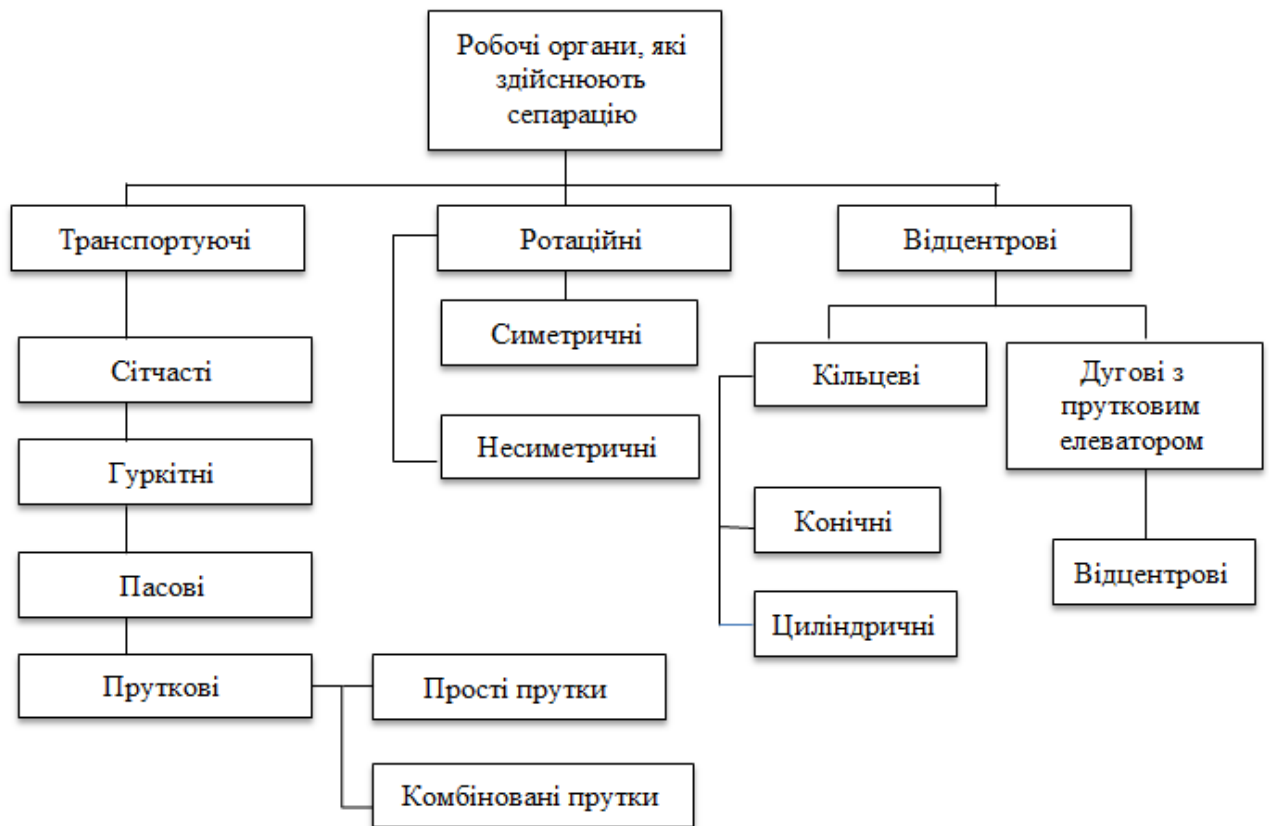


Рисунок 1.4 – Класифікація робочих органів просівної сепарації

При відхиленні умов оптимальних значень показники роботи, значно погіршуються. Для підвищення сепарувальної здатності в конструкції елеваторів більшості картоплезбиральних машин застосовують різні струшувачі та інтенсифікатори. Різнemu завантаженню сепарувального елеватора повинна відповідати певна інтенсивність струшування полотна. Найбільш ефективно регулювання амплітуди та частоти струшування забезпечується двоплечим важелем з роликками, привід якого здійснюється кривошипно-шатунним механізмом (рисунок 1.5 б). В цьому випадку полотно елеватора підкидається вгору за рахунок ударного впливу важеля. Можливість швидкого регулювання амплітуди та частоти струшування дозволяє забезпечити високу інтенсивність сепарації при зміні ґрунтових або погодних

умов. Недоліком таких сепараторів, зазвичай є підвищення пошкоджень бульб при збільшенні частоти і амплітуди струшування [8].

Шнеково-елеваторні сепаратори включають шнеки, розташовані над полотном (рисунок 1.5). Шнеки з гумовими лопатями обертаються назустріч руху полотна елеватора і змінюють напрямок руху бульбоносного вороху, сприяють інтенсивному ворошінню і просіюванню дрібного ґрунту [8]. У зоні розташування шнеків спостерігається висока руйнація та інтенсивність сепарації бульбоносного вороху. Недоліком шнеково-елеваторних сепараторів є затискання бульб картоплі між лопатями шнека та прутками, що призводить до значних пошкоджень бульб. Також до недоліків можна віднести нерівномірну сепарацію за площею полотна та високу металомісткість.

Для підкидання та прискорення полотна елеватора застосовують приводні ексцентрикові зірочки (рисунок 1.5 г) [8]. При обертанні приводного валу з ексцентриковими зірочками полотно не тільки підкидається, а й прискорюється та сповільнюється. Компоненти бульбоносної маси активно переміщуються вздовж елеватора, що підвищує сепарацію ґрунту. До недоліків цього способу інтенсифікації слід віднести значні динамічні навантаження, вібрації та розриви полотна.

Хвильовий елеватор є ще одним пристроєм, який забезпечує досить високу сепарацію (рисунок 1.5 д). Пруткове полотно хвильового елеватора рухається у вигляді «хвиль». Каскади хвиль сприяють переорієнтації компонентів бульбоносного вороху, його руйнування та транспортування [6]. Переорієнтація компонентів в середині бульбоносного вороху покращує сепарацію ґрунту та виключає скочування бульб.

Відомі інтенсифікатори сепарації, розміщені над прутковим елеватором – ворущники. Вони є пальцями на брусах, з приводом від кривошипно-шатунного механізму (рисунок 1.5 е), який забезпечує їх коливання поперек руху елеватора. За допомогою струшувачів відбувається розпушення та переорієнтація компонентів бульбоносного вороху пальцями [6]. Недоліком струшувачів є відносно високий ступінь пошкоджень бульб, особливо на

грунтах з грудками.

Рисунок 1.5 – Інтенсифікатори сепарації пруткових елеваторів

а – елеватор з еліптичним струшувачем; б - елеватор з регульованим струшувачем; в – елеватор із шнеком-активатором; г - елеватор з ексцентриковими зірочками; д – «хвильовий» елеватор; е – елеватор з ворушилками. 1 - полотно елеватора; 2 - допідтримувальні ролики; 3 - прутки; 4 - еліптичний струшувач; 5 - привідний вал; 6 - регульований струшувач; 7 - поперечний шнек; 8 - ворушилки; 9 – привідний механізм.

Інтенсифікатори сепарації пруткових елеваторів підвищують швидкість просіювання ґрунту. За рахунок застосування локальної інтенсифікації сепарації ґрунту на кількох ділянках елеватора. Відносний рух прутків елеватора створює умови для переорієнтації компонентів та сприяє просіву ґрунту. Зменшення інерційних навантажень від одночасного переміщення великих мас бульбоносного вороху та конструкцій елеватора сприяє зниженню

енергоємності процесу сепарації.

Для запобігання пошкоджень бульб на сепаруючому елеваторі при зіткненні з прутками на них встановлюють захисні покриття.

При визначенні профілю та товщини еластичного захисного покриття повинні бути враховані наступні фактори:

- завантаження елеватора масою, що сепарується (наявність ґрунту, грудок, бадилля, каміння і бур'янів);
- «живий перетин» та величина допустимих втрат бульб;
- транспортуюча здатність елеватора та кут його нахилу (обмеження зворотного скочування бульб з урахуванням коефіцієнта тертя кочення бульб при контакті з похилими поверхнями елеватора);
- ефективність струшування чи застосування інших інтенсифікаторів;
- запобігання можливості залипання сепаруючої поверхні (самоочищення) елеватора».

Прутки елеватора чергуються через один із захисним покриттям і без нього, це дозволяє виключити скочування бульб. Захисні покриття прутків бувають трубчасті, трубчасті багатопрофільні, покриття з гребенем. Класифікація конструкцій прутків наведено на рисунку 1.6.

Як правило, у технологічному процесі картоплезбиральної машини, а, отже, і в її конструкції, одного елеватора недостатньо. Елеваторів встановлюють декілька, причому найскладніші умови роботи спостерігаються у першого елеватора.

Перший основний сепаратор, працює при значному вмісті ґрунту в бульбоносному воросі, тому для просіювання ґрунту застосовується струшування полотна елеватора. Наявність ґрунтового прошарку між прутками та бульбами не вимагає значної товщини захисних покриттів. Зазвичай прутками сепаруючого елеватора встановлюють гумові або полімерні еластичні трубки товщиною 2...3 мм (рисунок 1.6 а, б).

Внаслідок сепарації на першому, до наступних сепараторів, надходження ґрунту зменшується, тому для пом'якшення удару бульб в прутки (амортизації)

на других (і наступних) елеваторах часто застосовують багатопорожнинні профілі (рисунок 1.6 в ... е). Профілі з гнучким гребенем додатково виключають скочування бульб вниз елеватором, знижуючи пошкодження бульб при переході з одного елеватора на інший і при підкиданні бульб на інтенсифікаторі. (Рисунок 1.6 ж).

Багато профільні покриття з повітряними порожнинами знижують пошкодження, проте зменшують просіювання ґрунту сепарувальними елеваторами.

Застосування еластичних захисних покриттів на прутках елеватора призводить до зниження «живого перерізу решета» та зменшення сепарації ґрунту [6]. Виникає протиріччя між кількістю пошкоджень і сепарувальною здатністю елеватора. Еластичні захисні покриття прутків ведуть до зниження пошкоджень бульб, що зменшує здатність сепарувального елеватора.

Тому на прутки основного елеватора встановлюють рухомі поліетиленові трубки зі значним зазором, які збільшують площу контакту з бульбою, знижуючи пошкодження. У той же час рухливість трубок сприяє просіюванню ґрунту та збільшенню сепарувальної здатності.

Рисунок 1.6 – Конструкції еластичних захисних профілів та пруткових сепарувальних елеваторів. а, б – трубки гумові або полімерні; в, г, д - багатопрофільні покриття з повітряними порожнинами; е, ж, з - покриття з гребенем; і – покриття в поліетиленовій трубці.

Таким чином, необхідно удосконалювати захисні покриття прутків сепарувальних елеваторів для підвищення сепарації ґрунту та зниження пошкоджень бульб [8].

1.4. Аналіз теоретичних досліджень пруткових елеваторів.

Сепарація ґрунту бульбоносного шару носить імовірнісний характер, і залежить від багатьох факторів. М.Л. Літошневий розглядав можливість проходу різних частинок у межах площі отвору. Допускаючи прохід різних частинок в отвір рівно ймовірним, він визначав його можливість положенням відносно отвору. Процес сепарації ґрунту на думку вчених складається з переміщення частинки ґрунту з верхніх шарів, і просіювання частинок відповідного розміру в отвір решета. Досліджуючи можливість проходу кількох частинок, було запропоновано вираз визначення повноти сепарації, який потім широко застосовувалося багатьма вченими [9]:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}, \quad 1.1$$

де ε - повнота виділення частинок з шару;

e – експонента;

τ_0 – постійна часу процесу;

t – час процесу.

Г.Д. Петровим для одного шару компонентів запропоновано емпіричну формулу на основі оцінки умов сепарації за допомогою спеціальних коефіцієнтів для визначення повноти просіювання ґрунту η :

$$\eta = 1 - e^{-k_4 T} + (1 - W) \frac{k_4}{k_4 - k_5} (e^{-k_4 T} - e^{-k_5 T}), \quad 1.2$$

де W - відносний вміст дрібного ґрунту у вихідному продукті;

T – час процесу сепарації;

k_4 – коефіцієнт здатності ґрунту до просіювання;

k_5 – коефіцієнт руйнування ґрунтових грудок.

Для оцінки сепарації також запропоновано відносний коефіцієнт сепарації ε :

$$\varepsilon = \frac{Q_{max} - Q}{Q_{max}}, \quad 1.3$$

де Q_{max} - подача бульбоносного шару на елеватор, кг/с;

Q – схід бульбоносного шару з елеватора, кг/с.

Для підкидання компонентів бульбоносного шару необхідно, щоб вертикальне прискорення полотна g_n було вище прискорення вільного падіння:

$$g_n > g \cos \alpha, \quad 1.4$$

де g - прискорення вільного падіння;

α – кут нахилу елеватора до горизонту.

При відриві підкидання компонентів бульбоносного шару елеваторами із струшувачами у вигляді еліптичних зірочок запропоновано формулу для мінімальної швидкості елеватора:

$$v_{min} = \sqrt{\frac{g \alpha}{(1 - c)^2}}, \quad 1.5$$

де c - відношення радіусів струшувача у вигляді еліптичної зірочки.

Н.В. Фірсов визначив швидкість полотна v_{min} для підкидання компонентів бульбоносного шару на елеваторах із струшувачами у вигляді еліптичної зірочки:

$$v_{min} = \pi \sqrt{\alpha \cdot \cos \alpha}, \quad 1.6$$

де α – більший радіус еліптичної зірочки.

Г.Д. Петровим запропоновано формулу визначення дальності польоту L_n компонента бульбоносного шару після підкидання на елеваторі з струшувачем як двоплечого важеля з роликками [9].:

$$L_n = \frac{2v_e \cdot v_n}{g}, \quad 1.7$$

де v_E – лінійна швидкість елеватора;

v_n – вертикальна швидкість підкидання елеватора.

Петров Г.Д. запропонував формулу для визначення коефіцієнта «живого перерізу» елеватора η_c :

$$\eta_c = \frac{t-d}{t} \cdot 100\% \quad 1.8$$

де t - крок прутків елеватора, м;

d – середній діаметр прутка, м.

Досліджуючи роботу комбінованих прутків запропоновано визначати швидкість комбінованого прутка за формулою:

$$V_B = \frac{2(r+S)\left(r - \frac{d}{2}\right)}{\left[r(R+h) - \left(r \cdot \frac{d}{2} + S \cdot \frac{d}{2} + Rr\right) \cos \alpha\right]} \cdot V_A \quad 1.9$$

де r - радіус трубки;

R – радіус кулачка;

α - напрямний кут положення трубки на кулачці;

h – величину зазору між кулачком та віссю дроту полотна елеватора;

S – товщину стінки трубки;

d – діаметр прутка;

$V_A = V_{пол}$ – швидкість полотна елеватора, м/с.

Аналізуючи дослідження, проведені вченими встановлено, що ефективність сепарації бульбоносного шару визначається конструктивними параметрами та кінематичними режимами роботи сепарувальних елеваторів. Інтенсивність просіву ґрунту між прутками елеватора визначається необхідністю підкидання компонентів бульбоносного шару для їх переорієнтації та руйнування для просіву. Також встановлено, що модернізація сепарувальних пристроїв картоплезбиральних машин має сприяти зниженню пошкоджень бульб та енерговитрат на сепарацію ґрунту за рахунок локального впливу [9].

1.5. Висновки до 1 розділу.

Можливість забезпечити достатню сепаруючу здатність при необхідній швидкості транспортування бульбоносного вороху в широкому діапазоні умов застосування визначає широке застосування та перспективність подальшого використання пруткових елеваторів у коренебульбозбиральних машинах, у тому числі в машинах для збирання картоплі. Зниження сепаруючої здатності в конкретних умовах експлуатації значною мірою пов'язане з труднощами, що виникають, взаємного переміщення компонентів картопляного вороху, і усувається локальним застосуванням інтенсифікаторів-струшувачів полотна пруткового елеватора. Інтенсифікація сепарації призводить до підвищення пошкоджень бульб, що робить перспективним застосування пристроїв «дбайливої» сепарації, наприклад, у вигляді пруткових елеваторів, оснащених захисним полімерним покриттям прутків, виконаних у вигляді трубок, встановлених на пруток із зазором (т.зв. «комбінованих» прутків)).

На підставі вищевикладеного, метою роботи є зниження втрат та пошкоджень бульб картоплі шляхом обґрунтування параметрів елеватора з комбінованими прутками.

2.2. Теоретичні дослідження елеватора з комбінованими прутками картоплезбиральних машин.

2.1. Передумови для вдосконалення елеваторів картоплезбиральних машин.

При збиранні картоплі фізико-механічні властивості ґрунту постійно змінюються. Навіть для однакової твердої сипучої консистенції ґрунту, як правило, вихідний матеріал не має певної розмірної характеристики. У той же час дослідженнями вчених встановлено, що на якість процесу сепарації ґрунту великий вплив має відношення розміру ґрунтових агрегатів до розміру отворів [12]. Тому існують поняття «важкі», «складні» і «легкі» компоненти бульбоносного шару. "Важкі" - це компоненти менше розміру отвору S , але близькі до нього, приблизно від $0,7-0,8 S$ до S , "складні" - компоненти більше розміру отвору, але близькі до нього, приблизно від S до $1,5 S$ та «легкі» – компоненти дрібніші за $0,6 S$ [12].

Чим більше в ґрунті «важких» і «складних» компонентів, тим, за інших рівних умов, ефективність сепарації знижується, по виду характеристики фракційного складу ґрунту можна судити про можливість її відокремлення. Специфічною особливістю ґрунту є те, що ці характеристики безперервно змінюються. У кожний момент часу розмір частинок у ґрунтової маси може бути визначений як випадкова величина з деяким законом розподілу.

Для зернових сумішей це величини, що визначаються за допомогою класифікатора, приймаються (для кожної сортової партії) постійними [12]. У разі сепарації ґрунту вони є змінними величинами у ймовірносно-статичному сенсі, що носять довільний характер. Особливістю процесу сепарації ґрунту є безперервне утворення в процесі сепарації на елеваторі дрібних частинок ґрунту, що відбувається в результаті зіткнень грудок ґрунту та прутків елеватора.

Таким чином, вихідний фракційний склад ґрунтової суміші що надходить

на сепаруючий робочий орган, змінюється не тільки в результаті просіювання дрібних, проходових частинок, але й внаслідок руйнування великих, непрохідних фракцій. Істотною, характерною технологічною особливістю процесу сепарації в картоплезбиральному комбайні є вкрай неоднакова завантаження елеваторів, розташованих на початку та в середині технологічного процесу комбайна, що відзначається і в літературі [12].

Просіювання ґрунту крізь прутки елеватора відбувається в умовах хаотичного руху різноманітних за своєю формою та розмірами частинок у шарі суміші та на елеваторі. Крім того, мінливість властивостей ґрунту, неточності форми та розмірів отворів між прутками, власні вібрації та безліч інших факторів елеватора, що не піддаються контролю та управлінню – все це дозволяє розглядати сепарацію ґрунту на елеваторі як випадковий процес. Необхідно відзначити, що фактор самосортування надаватиме вирішальний вплив на ймовірність просіювання частинок тільки при просіюванні частинок ґрунту значно менших за розміром, як просвіт, що характерно для основного сепаруючого робочого органу картоплезбиральних машин [12].

При просіюванні частинок ґрунту близьких за розміром до величини просвіту, вирішальне значення для просіювання набуває ймовірність другої події – проходження частинки через просвіт. Отже, якщо розмір частинки близький до розміру отвору, процес самосортування - це тільки частина процесу просіювання частинки через просвіт.

Таким чином, для підвищення ефективності сепарації необхідно забезпечити взаємне переміщення компонентів бульбоносного шару поверхні елеватора. Це можливо при забезпеченні взаємного руху прутків елеватора при використанні комбінованих прутків.

Ударні взаємодії комбінованих прутків з компонентами бульбоносного шару, що виникають під час роботи елеватора також сприяють подрібненню частинок ґрунту.

2.2. Перспективна конструктивно-технологічна схема елеватора з комбінованими прутками.

За результатами виконаного аналізу стану питання та вивчення теоретичних передумов удосконалення пруткових елеваторів нами пропонується нове схемно-конструктивне рішення пруткового елеватора з комбінованими прутками. Сепаруючий елеватор картоплезбиральної машини складається з гнучких тягових елементів 1 з комбінованими прутками, що являють собою прутки 2 з надітими на них циліндричними трубками 3 виконаними з поліетилену високого тиску (рисунок 2.1).

На кожному комбінованому прутку розташована певна кількість циліндричних трубок. Привідний вал забезпечує рух полотна, при цьому трубки комбінованих прутків 3 розташовані над інтенсифікаторами 5 у вигляді каскадів роликів, що обертаються. Трубка комбінованого прутка одночасно знаходиться в контакті з прутком 2 і обертовим роликом інтенсифікатора 5. Каскади роликів, що обертаються, встановлені по черзі по площі полотна сепаруючого елеватора картоплезбиральної машини.

Рисунок 2.1 – Технологічна схема удосконаленого пруткового елеватора

1 – прогумована тягова стрічка; 2 - пруток елеватора; 3 – циліндрична трубка (по кілька трубок на пруток); 4 – роликовий інтенсифікатор; 5 – рама; 6 – барабан ведучий; 7,8 - барабани ведені; 9 - компонент бульбоносного вороху; 10 - залишки бадилля; 11 - коренебульбоплід.

При русі полотна, утвореного гнучкими тяговими елементами 1 з комбінованими прутками, циліндричні трубки 3 взаємодіють з інтенсифікаторами 5 у вигляді каскадів роликів, що обертаються. В результаті взаємодії циліндричні трубки 3 перекочуються по каскадах роликів, що обертаються, при чому відбувається обертання циліндричної трубки 3 відносно прутка 2 полотна елеватора. Так як інтенсифікатори 5 розташовані з чергуванням площі полотна сепаруючого елеватора, то відбувається зміщення картопляного вороху за рахунок складного руху циліндричних трубок.

Зміщення вороху викликає знакозмінні навантаження, які призводять до руйнування та сепарації ґрунту. Установка каскадів роликів, що обертаються 6 з чергуванням по площі полотна сепаруючого елеватора картоплезбиральної машини викликає відносне переміщення проходових частинок відносно зазорів між комбінованими прутками, що покращує процес сепарації. Ступінь впливу комбінованих прутків на бульби визначається кількістю інтенсифікаторів.

Завдяки обертанню каскадів роликів трубки 3 комбінованих прутків перекочуються, внаслідок чого тертя ковзання замінюється тертям кочення.

2.3. Теоретичні дослідження руху комбінованих прутків елеватора картоплезбиральної машини

З метою дослідження руху та обґрунтування раціональних значень параметрів комбінованих прутків елеватора картоплезбиральної машини, беручи до уваги можливість прокручування циліндричних трубок, обґрунтуємо значення кутової швидкості обертання, лінійної швидкості та прискорення циліндричної трубки, що відповідають режиму роботи елеватора з роликом інтенсифікатора. Для теоретичних досліджень використовуємо методи аналітичної геометрії, математичного аналізу, опору матеріалів, лінійної алгебри[14].

У теоретичному аналізі враховуватимемо наступні припущення:

- у процесі взаємодії відбувається пружний удар;

- полотно елеватора рухається прямолінійно;
- трубка має достатню жорсткість.

Розглянемо рух циліндричної трубки по ролику інтенсифікатора, що має профіль у вигляді кола. З урахуванням неможливості переміщення циліндричних трубок вздовж осьової лінії комбінованого прутка, розглянемо плоску декартову систему координат.

Трубки прутка сепаруючого елеватора масою m і радіусом r зустрічаються з роликом інтенсифікатора, що призводить до удару трубки об ролик (рисунок 2.2). Так як трубка вільно надіта на пруток, удар буде пружний. Припустимо, що трубка переміщається по ролику та прутку без ковзання. Величина кута визначається геометричними параметрами трубки, прутка і ролика. Визначимо швидкість центру трубки після удару, з урахуванням маси трубки і маси бульбоносного вороху, що припадає на трубку. Початкову швидкість трубки до удару приймемо рівної швидкості полотна елеватора V_c . Для визначення швидкості трубки після удару скористаємося миттєвим центром швидкостей, який розташований у точці зіткнення трубки та ролика.

Рисунок 2.2 – Схема визначення параметрів взаємодії трубки прутка з роликом інтенсифікатора.

Розкладемо ударну реакцію, яка діє на трубку, на напрямки по дотичній та нормалі до поверхні трубки. Аналогічно розкладуться складові імпульсу \vec{S}_F та \vec{S}_N , на дотичну та нормаль (рис. 2.2). Після удару трубка повернеться довкола миттєвого центру швидкостей.

Величину ударного імпульсу визначимо за допомогою виразу:

$$m(\vec{u}_c - \vec{V}_c) = \vec{S}_F + \vec{S}_N, \quad 2.1$$

де m - вага трубки;

V_c - швидкість центру трубки до удару;

u_c - швидкість центру трубки після удару.

Обертання трубки визначимо наступним чином

$$J_c(\omega_\tau - \omega_0) = -S_F \cdot r, \quad 2.2$$

де J_c - момент інерції трубки;

ω_0 - кутова швидкість трубки до удару;

ω_τ - кутова швидкість трубки після удару.

Кутові швидкості трубки пов'язані з лінійними швидкостями наступними виразами, $\omega_\tau = \frac{u_c}{r}$, $\omega_0 = \frac{V_c}{r}$. Спроектуємо рівняння (2.3) на осі та проведемо заміну в рівнянні (2.2):

$$\begin{cases} m(u_c - V_c \cos \alpha) = S_F \\ m(0 - V_c \sin \alpha) = S_N \\ mr^2 \left(\frac{u_c}{r} - \frac{V_c}{r} \right) = -S_F \cdot r \end{cases} \quad 2.4$$

де α - кут напрямку взаємодії ролика з трубкою ($\cos \alpha = \frac{a}{r}$, $\sin \alpha = \frac{b}{r}$,

величина кута визначається геометричними параметрами трубки комбінованого прутка (внутрішній діаметр трубки $d_l = 2r$) і ролика інтенсифікатора, а також їх взаємним розташуванням:

$$\cos \alpha = \frac{R - r + d + e}{R + r + e}, \quad 2.5$$

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{R - r + d + e}{R + r + e} \right)^2}, \quad 2.6$$

Вирішуючи спільно рівняння (2.2) визначимо невідомі величини u_c , S_F , S_N , як залежно від початкової швидкості трубки V_c , тоді рівняння запишуться у вигляді:

$$\begin{cases} m(u_c - V_c \cos \alpha) = S_F \\ m(u_c - V_c) = -S_F \end{cases} \quad 2.7$$

Провівши відповідне перетворення, визначимо складові ударного імпульсу \vec{S}_F та \vec{S}_N :

$$\begin{cases} S_F = \frac{1}{2} m V_c (1 - \cos \alpha) \\ S_N = m V_c \sin \alpha \end{cases}, \quad 2.8$$

Тоді швидкість центру трубки після удару визначиться

$$u_c = \frac{1}{2} V_c (1 + \cos \alpha), \quad 2.9$$

Підставивши у формулу (2.9) значення (2.5), отримаємо

$$u_c = \frac{1}{2} V_c \left(1 + \frac{R - r + d + e}{R + r + e} \right), \quad 2.10$$

Розрахуємо величину швидкості центру трубки після удару в ролик у програмі Mathcad та побудуємо графіки залежностей (рисунки 2.3-2.5).

Аналіз рисунка 2.3 показав, що діаметр ролика впливає на величину швидкості центру трубки, при значеннях менше 0,010 м швидкість центру трубки інтенсивно зменшується, а при значеннях більше 0,10 м монотонно зростає. Слід зазначити, що при діаметрі ролика більше 0,10 м також змінюється напрямок швидкості, збільшується кут швидкості до горизонту, отже може збільшувати висота і дальність польоту бульби.

Рисунок 2.3 – Залежність швидкості центру трубки після удару в ролик від діаметра ролика.

Рисунок 2.4 – Залежність швидкості центру трубки після удару в ролик від діаметра трубки ($d_l = 2r$)

Аналіз рисунка 2.4 показав, що зі збільшенням діаметра трубки комбінованого прутка зменшується швидкість центру трубки, а також зменшується коефіцієнт живого перерізу решета. Тому слід вибирати менше значення діаметра трубки, діаметр трубки 0,0125 м є раціональним.

Рисунок 2.5 - Залежність швидкості центру трубки після удару в ролик від початкової швидкості трубки до удару (швидкість руху елеватора)

Аналіз рисунка 2.5 показав, що величина швидкості центру трубки прямо пропорційно залежить від швидкості. Визначимо умову підкидання бульбоносного вороху, застосувавши теорему про зміну кінетичної енергії при повороті трубки навколо ролика на певний кут.

$$T - T_0 = \sum A \quad 2.11$$

Так як диск бере участь у поступальному та обертальному русі одночасно, то повна кінетична енергія диска

$$T = T_{K_{пост}} + T_{K_{об}} \quad 2.12$$

де $T_{K_{пост}}$ - кінетична енергія поступального руху трубки;

$$T_{K_{пост}} = \frac{m u_c^2}{2} \quad 2.13$$

$T_{K_{об}}$ - кінетична енергія обертального руху трубки.

Кінетична енергія обертального руху трубки визначається рівнянням

$$T_{K_{об}} = \frac{J \omega_\tau^2}{2} \quad 2.14$$

Момент інерції трубки комбінованого прутка представимо як момент інерції обода

$$J = mr^2, \quad 2.15$$

Кутова швидкість трубки пов'язана з лінійним рівнянням

$$\omega_\tau = \frac{u_c}{r} \quad 2.16$$

Тоді повна кінетична енергія, що враховує поступальну та обертальну складові трубки, визначаються рівнянням

$$T = \frac{mu_c^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} = \frac{mu_c^2}{2} + \frac{mr^2u_c^2}{2r^2} = mu_c^2 \quad 2.17$$

З урахуванням обертання трубки, її кінетична енергія до удару визначається рівнянням

$$T_0 = mV_c^2. \quad 2.18$$

Кінетична енергія трубки після удару визначається рівнянням

$$T = mu_c^2 \quad 2.19$$

Робота підкидання трубки з компонентами бульбоносного вороху

$$\sum A = m_1gh, \quad 2.20$$

де m - вага трубки з урахуванням ваги бульбоносного вороху кг;

g - прискорення вільного падіння, м/с².

Виразимо величини швидкостей, підставивши значення рівнянь (2.18), (2.19) та (2.20):

$$V^2 = u_c^2 - \frac{m_1}{m}gh. \quad 2.21$$

Підйом трубки комбінованого прутка можливий за умови:

$$u_c^2 \geq \frac{m_1}{m}gh. \quad 2.22$$

Підставивши значення швидкості після удару (2.9), отримаємо

$$\frac{V_c^2}{4}(1 + \cos \alpha)^2 \geq \frac{m_1}{m}gh. \quad 2.23$$

Виразимо величину підкидання бульбоносного вороху:

$$h \leq \frac{\frac{V_c^2}{4} (1 + \cos \alpha)^2}{g} \frac{m_1}{m} \quad 2.24$$

Вага трубки з урахуванням ваги бульбоносного шару визначається надходженням бульбоносного шару та довжиною трубки. Враховуючи, що крок прутків є постійною величиною, вага компонентів, що припадають на трубку комбінованого прутка, визначається довжиною трубки.

$$m_1 = dm_1 \cdot l_1, \quad 2.25$$

де dm_1 - питома вага трубки з урахуванням ваги бульбоносного шару кг/м;

l_1 - довжина трубки комбінованого прутка, мм.

Тоді величина підкидання компонентів бульбоносного шару з урахуванням формули (2.5) визначиться формулою:

$$h \leq \frac{\frac{V_c^2}{4} \left(\frac{2R + d + 2e}{R + r + e} \right)^2}{g} \frac{m_1}{dm_1 \cdot l_1} \quad 2.26$$

Проведемо числове моделювання висоти підкидання компонентів бульбоносного вороху в програмі Mathcad, задавши геометричними параметрами комбінованого прутка та ролика інтенсифікатора, а також швидкістю сепаратора: $m = 0,05$ кг, $R = 0,10-0,15$ м; $r = 0,0125-0,015$ м; $d = 0,011-0,12$ м; $e = 0,002-0,004$ м; $V_c = 2,0-2,2$ м/с (рисунки 2.6 -2.7).

Для проведення моделювання накладемо обмеження – висота підкидання бульб має перебувати в діапазоні 0,09-0,10 м. Зазначений діапазон забезпечує руйнування ґрунтового шару, переорієнтацію компонентів та унеможливило пошкодження бульб.

Аналіз рисунка показав, що висота підкидання значною мірою визначається масою бульбоносного вороху m_1 , що припадає на довжину трубки. Варіювання розмірами трубки, її товщини, радіусу ролика інтенсифікатора дозволило встановити, що раціональними параметрами є: швидкість елеватора, радіус ролика, внутрішній радіус трубки, довжина трубки. При раціональних

параметрах висота підкидання бульб складатиме менше 0,10 м.

Рисунок 2.6 - Залежність висоти підкидання компонентів бульбоносного шару від швидкості елеватора

Рисунок 2.7 – Залежність висоти підкидання компонентів бульбоносного шару від довжини трубки комбінованого дроту

Аналіз рисунка 2.6 показав, що висота підкидання компонентів бульбоносного шару інтенсивно зростає від швидкості елеватора, тому слід обмежувати швидкість елеватора, щоб уникнути пошкоджень бульб.

Аналіз рисунка 2.7 показав, що раціональна висота підкидання не більше 0,10 м досягається при довжині трубки комбінованого прутка 0,25-0,30 м. Слід зазначити, що вплив довжини трубки обумовлено масою бульбоносного шару, що знаходиться на трубці комбінованого прутка.

Умова відсутності прослизання трубки при ударі в ролик запишемо,

використовуючи гіпотезу Рауса для удару:

$$|S_F| \leq S_{Fmax} = fS_N, \quad 2.27$$

де S_F і S_N - дотичний і нормальний імпульси удару;

f - коефіцієнт тертя ковзання трубки об ролик інтенсифікатор при ударі.

Гранична умова прослизання описується рівнянням:

$$|S_F| = S_{Fmax} = fS_N, \quad 2.28$$

Перетворимо рівняння (2.27) - умова відсутності прослизання трубки по ролику, підставивши значення ударних імпульсів та з рівняння (2.1), отримаємо:

$$\frac{1}{2}mV_c(1 - \cos \alpha) \leq fmV_c \sin \alpha. \quad 2.29$$

Звідси величина коефіцієнту тертя ковзання трубки об ролик визначиться нерівністю:

$$f \geq \frac{1 - \cos \alpha}{2 \sin \alpha}. \quad 2.30$$

Розрахуємо величину коефіцієнта тертя ковзання трубки об ролик у програмі Mathcad та побудуємо графік залежності (рисунок 2.8).

Аналізуючи залежність коефіцієнта тертя ковзання трубки об ролик можна побачити, що умова відсутності прослизання трубки при ударі виконується при величині коефіцієнта тертя ковзання для радіуса трубки $r = 0,015$ м. Таким чином, пружний удар трубки в ролик можливий у широкому діапазоні умов.

Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнту тертя ковзання трубки об ролик від радіусу трубки комбінованого прутка

2.4. Обґрунтування параметрів та режимів роботи елеватора з комбінованими прутками.

При русі секційних комбінованих прутків по роликівим трубкам комбінованого прутка що вільно обертаються трубка комбінованого прутка обганяє пруток, набуваючи додаткової швидкості. Розглянемо рух комбінованого прутка в поздовжньо-вертикальній площині. При цьому розглядатимемо рух центру трубки комбінованого прутка відносно центру прутка при русі з роликом.

Переміщення трубки комбінованого прутка визначатиметься взаємним положенням прутка відносно ролика, при цьому переміщення також залежатиме від діаметра ролика, діаметра прутка, діаметра та товщини трубки (рисунок 2.9).

Бульба, підкидається полотном з початковою швидкістю u_c , спрямованою під кутом до горизонту α , нехтуючи опором повітря. Визначимо дальність польоту бульби, якщо бульба має вагу G [10].

Рисунок 2.9 - Розрахункова схема взаємодії комбінованого прутка з компонентом бульбоносного вороху.

Секційний комбінований пруток сконструйований таким чином, що при взаємодії з бульбою пружно стискається, обмежуючи напруги, що виникають, і знижуючи пошкоджуваність бульб. Насамперед, визначимо час підйому бульби до найвищого положення та траєкторію руху.

Припустимо, що до бульби прикладена постійна сила тяжіння $G = mg$, направлена вертикально вниз.

Виберемо рухомі осі координат $Oxyz$ під кутом до горизонту та паралельно поверхні полотна елеватора так, як показано на рисунку 2.10. Використавши теорему про зміну кількості руху визначимо імпульс сили бульби в проекціях на площину xOy

$$mu - mu_c = \int_{t_0=0}^t F_u dt, \quad 2.31$$

При обраному напрямі осі проекції маємо $u_{yc} = u_c \sin \beta$, $u_{xc} = u_c \cos \beta$ (оскільки у найвищому положенні бульби швидкість її спрямована горизонтально), враховуючи, що вертикальна складова $F_z = -G = -mg$.

Підставляючи ці значення рівняння (2.31), отримаємо

Рисунок 2.10 – Схема розташування координатних осей при польоті компонентів бульбоносного вороху

$$\begin{cases} -m u_c \sin \beta = -mgt \\ -m u_c \cos \beta = -mgt \end{cases} \quad 2.$$

Знайдемо час підйому бульби на найбільшу висоту

$$t = \frac{u_c \cos \beta}{g}. \quad 2.$$

Рівняння руху бульби до моменту досягнення нею найбільшої висоти будуть

$$\begin{cases} x = u_c t \sin \beta, \\ y = u_c t \cos \beta, \\ z = u_c t \sin \gamma - \frac{gt^2}{2} \end{cases} \quad 2.$$

Розрахуємо траєкторію руху бульби вздовж пруткового елеватора у програмі Mathcad і побудуємо графік залежності (рисунок 2.11).

Після досягнення максимальної висоти, бульба почне знижуватися по параболі. У точці найбільшого підйому бульби, рівняння руху бульби матимуть вигляд

$$\begin{cases} x_1 = u_{c_x} t, \\ y_1 = u_{c_y} t, \\ z_1 = -\frac{gt^2}{2} \end{cases} \quad 2.$$

де U_{cx} - проекція абсолютної швидкості бульби по осі ОХ;

U_{cy} - проекція абсолютної швидкості бульби по осі ОУ.

$$u_{c_x} = u_c \cos \beta, \quad 2.$$

Рисунок 2.11 - Траєкторія руху бульби вздовж пруткового елеватора
1,2,3 - траєкторії руху при різних швидкостях трубки комбінованого прутка: 2,5; 2,25; 2,0 м/с відповідно

Аналізуючи траєкторії руху (польоту) компонентів картопляного вороху відносно елеватора можна побачити, що дальність польоту компонентів у поперек елеватора приблизно однакова дальності вздовж елеватора, і становить близько 0,25-0,35 м. При цьому висота траєкторії дещо менше при поперечному русі і не перевищує 0,06м.

Розрахуємо траєкторію руху бульби впоперек пруткового елеватора у програмі Mathcad і побудуємо графік залежності (рисунок 2.12).

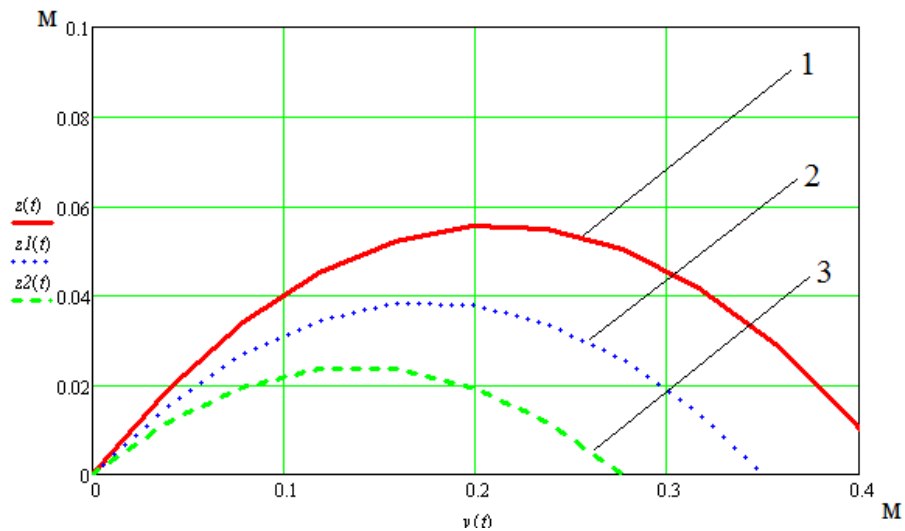


Рисунок 2.12 – Траєкторія руху бульби впоперек пруткового елеватора 1,2,3 - траєкторії руху при різних швидкостях трубки комбінованого прутка: 2,5; 2,25; 2,0 м/с відповідно.

Максимальна дальність польоту бульби від точки А

$$x_1^{max} = \frac{v_0^2 \sin \gamma \cos \beta}{g}, \quad 2.$$

Таким чином, застосування секційних комбінованих прутків сприяє перерозподілу бульбоносного вороху по елеватору та покращує сепарацію ґрунту.

2.5 Дослідження процесу зіткнення бульб картоплі з комбінованими прутками

Після підкидання бульба ударяється в комбіновані прутки.

Розглянемо проєкції швидкостей бульби та трубки комбінованого прутка після удару (рисунок 2.13).

Рисунок 2.13 – Розрахункова схема визначення параметрів зіткнення бульби з комбінованим прутком

На підставі закону зміни кількості руху точки в проекції на площину (вісь x) при ударі запишемо рівняння швидкості бульби [10]. Припустимо, що поверхня комбінованих прутків гладка, тоді зміна швидкості визначається законом збереження енергії:

$$m_1(\vec{u}_{x1} - \vec{v}_{x1}) = 0 \quad 2.$$

де m_1 - маса бульби, кг;

u_{x1} - проекція на вісь OX швидкості бульби до удару, м/с;

v_{x1} - проекція на вісь OX швидкості бульби після удару, м/с.

Проекції швидкостей до удару та після удару можна записати у вигляді

$$u_{x1} = u_1 \sin \varphi \quad 2.$$

$$v_{x1} = v_1 \sin \psi \quad 2.$$

де u_1 – швидкість бульби до удару, м/с;

v_1 – швидкість бульби після удару, м/с;

φ – кут падіння бульби;

ψ – кут відскоку бульби після удару.

З урахуванням формул (2.38), (2.39) та (2.40), отримаємо

$$u_1 \sin \varphi = v_1 \sin \psi \quad 2.$$

Модулі проекцій швидкостей бульби до удару та після удару пов'язані коефіцієнтом відновлення

$$k = \frac{u_1 \sin \varphi}{v_1 \sin \psi} \quad 2.$$

де k - коефіцієнт відновлення бульби.

Використовуючи формули (2.41) та (2.42) ми можемо визначити залежність кута падіння бульби та кута відскоку

$$\operatorname{tg} \psi = (1/k) \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad 2.$$

Швидкість бульби після удару можна визначити виходячи з формул (2.42) та (2.43):

$$v_1 = \frac{u_1 \sin \varphi}{k \sin \left(\frac{\varphi}{\operatorname{arctg}(k)} \right)} \quad 2.$$

На підставі формули (2.44) побудуємо у програмі Mathcad графік зміни швидкості відскоку бульби (рисунок 2.14)

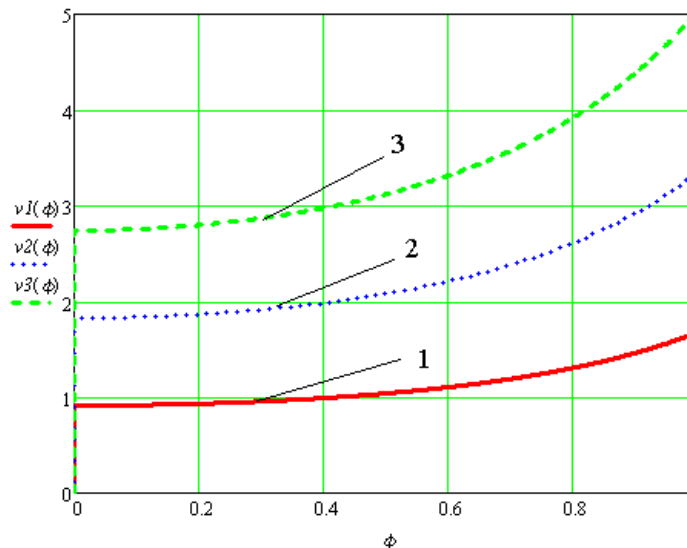


Рисунок 2.14 – Залежність зміни швидкості відскоку після зіткнення бульби з комбінованим прутком від кута падіння

1- при швидкості бульби до зіткнення 1 м/с; 2 - при швидкості бульби до зіткнення 3 м/с; 3 - при швидкості бульби до зіткнення 3 м/с. падіння

Аналізуючи залежність зміни швидкості відскоку після зіткнення бульби з комбінованим прутком від кута падіння можна бачити, що швидкість відскоку бульб більшою мірою визначається швидкістю бульби до зіткнення, а також кутом падіння бульби. Так, при куті падіння близько 30° та швидкості падіння 2 м/с швидкість відскоку становить 2,2 м/с.

2.6. Висновки до 2 розділу.

1. Встановлено, що перспективне схемно-конструктивне рішення сепаратора картоплезбиральної машини повинно містити гнучкі тягові елементи з комбінованими прутками, що являють собою прутки з одягненими на них циліндричними трубками, виготовленими з поліетилену високого тиску. Каскади роликів, що обертаються, повинні бути встановлені з чергуванням по площі полотна сепаруючого елеватора картоплезбиральної машини. Так як ролики розташовані з чергуванням за площею полотна сепаруючого елеватора, виникає зміщення картопляного вороху за рахунок складного руху циліндричних трубок, яке викликає знакозмінні навантаження, що призводять до руйнування і сепарації бульбоносного вороху.

2. Встановлено, що діаметр ролика впливає на величину швидкості центру трубки, раціональним значенням діаметра ролика є значення 0,010 м. Зі збільшенням діаметра трубки комбінованого прутка зменшується швидкість центру трубки, а також зменшується коефіцієнт живого перерізу решета. Тому слід вибирати менше значення діаметра трубки, діаметр трубки 0,0125 м є раціональним.

3. Встановлено, що величина швидкості центру трубки прямо пропорційно залежить від швидкості. Висота підкидання компонентів бульбоносного шару інтенсивно зростає від швидкості елеватора, тому слід обмежувати швидкість елеватора, щоб уникнути пошкоджень бульб.

4. Встановлено, що раціональна висота підкидання не більше 0,10 м досягається при довжині трубки комбінованого прутка 0,25-0,30 м.

Таким чином, пружний удар трубки в ролик інтенсифікатора можливий у широкому діапазоні умов.

6. Аналіз траєкторії руху (польоту) компонентів картопляного вороху відносно елеватора дозволив встановити, що дальність польоту компонентів вздовж і поперек елеватора становить близько 0,25-0,35 м, при цьому висота траєкторії дещо менша при поперечному русі і не перевищує 0,06м. Таким чином, застосування секційних комбінованих прутків сприяє перерозподілу бульбоносного вороху елеватором.

7. Встановлено, що швидкість відскоку після зіткнення бульби з комбінованим прутком більшою мірою визначається швидкістю бульби до зіткнення, а також кутом падіння бульби. Так, при куті падіння близько 250 і швидкості падіння 2 м/с швидкість відскоку становить 2,1 м/с.

3. Експериментальні дослідження комбінованих прутків елеватора картоплезбиральних машин.

3.1 Програма, методика експериментальних досліджень комбінованих прутків елеватора картоплезбиральних машин.

Теоретичними дослідженнями встановлено, що в процесі роботи сепаратора, з комбінованими прутками, бульби підкидаються при взаємодії комбінованих прутків з роликами.

Характеристики руху бульб, що при цьому спостерігається, є найважливішими параметрами, що впливають на втрати і пошкодження бульб при роботі елеватора і машини в цілому [18]. Для уточнення характеристик цього руху було проведено експериментальні дослідження у лабораторних умовах.

Програма експериментальних досліджень включала дослідження траєкторій руху бульб картоплі при підкиданні та падінні на композитні прутки сепаруючого елеватора.

Об'єктом дослідження виступав процес роботи пруткового елеватора, оснащеного комбінованими прутками.

Нижче наведено методику експериментальних досліджень.

На елеватор із комбінованими прутками подавали бульби. При взаємодії комбінованих прутків з роликами трубки комбінованих прутків повертаються, тим самим змінюючи напрямок швидкості та отримуючи непружний ударний імпульс, з іншого боку відбувається інтенсивний вплив на грудки ґрунту, які руйнуються та просіюються. Для оцінки взаємодії бульб бульбоносного вороху з прутками була проведена швидкісна зйомка процесу взаємодії за допомогою камери зі швидкістю 200 кадрів за секунду з використанням мультикадрової зйомки. Для обробки отриманого матеріалу проводився покадровий аналіз масштабної сітки. Для аналізу траєкторії руху компонентів вибиралися типові траєкторії середніх за розміром бульб, отримані результати досліджень

опрацьовувалися методами математичної статистики [18].

Для вивчення траєкторії руху бульб при підкиданні був використаний картоплекопач, обладнаний елеватором з комбінованими прутками (рисунок 3.1).

Рисунок 3.1 – Загальний вид картоплекопача, обладнаного елеватором з комбінованими прутками для вивчення траєкторії руху бульб при дії трубки на бульби

Для проведення експерименту на основі теоретичних досліджень та попередніх експериментів було обрано фактори варіювання [18].

Параметри експерименту наведено у матриці планування (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Матриця планування експерименту щодо оцінки впливу швидкості елеватора та діаметра роликів інтенсифікатора на траєкторію руху компонентів вороху (бульб).

Рівні варіювання факторів	Чинники варіювання				Функція оптимізації	
	Швидкість елеватора		Діаметр роликів		Висота траєкторії бульби	Довжина траєкторії бульби
Види значень	кодув. знач.	натур. знач., м/с	кодув. знач.	натур. знач., градуси	м	м
Верхній рівень	+1	2,5	+1	0,15	H ₁	L ₁
Нульовий рівень	0	2,0	0	0,125	H ₂	L ₂
Нижній рівень	-1	1,5	-1	0,10	H ₃	L ₃

Для оцінки траєкторії та величини відскоку бульб на задньому фоні закріплена масштабна сітка. У ході дослідження вивчався вплив початкової швидкості бульби, напрямки її руху та кут нахилу полотна на величину відскоку бульби. Параметри експерименту наведено у матриці планування (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Матриця планування експерименту з оцінки впливу початкової швидкості бульби, напрямки його руху та кута нахилу полотна елеватора на параметри відскоку бульби.

Рівні варіювання факторів	Чинники експерименту						Функція оптимізації
	Початкова швидкість бульба		Напрямок руху бульба		Кут нахилу полотна елеватора		Відскок бульби після зіткнення
Види значень	кодув. знач.	натур. знач., м/с	кодув. знач.	натур. знач., градуси	кодув. знач.	натур. знач., градуси	м
Верхній рівень	+1	3,0	+1	30	+1	30	S ₁
Нульовий рівень	0	2,0	0	25	0	25	S ₂
Нижній рівень	-1	1,0	-1	20	-1	20	S ₃

Установка включає кінетичну трубу для надання необхідної швидкості бульби та направлення її під потрібним кутом. Полотно елеватора з комбінованими прутками закріплене нерухомо з можливістю встановлення потрібного кута нахилу (рисунок 2).

Рисунок 3.2 – Загальний вид установки вивчення траєкторії руху бульб при відскоку від комбінованих прутків

1 – кінетична труба; 2 – бульба; 3 – масштабна сітка; 4 – комбіновані прутки; 5 – полотно елеватора; 6 – фіксатор для регулювання кута нахилу полотна.

3.2. Результати експериментальних досліджень комбінованих прутків елеватора картоплезбиральних машин.

На рисунку 3.3 показано дослідження траєкторій відбивання бульб на комбінованих прутках та відскоку бульб при падінні на комбіновані прутки за різних параметрів руху.

При аналізі кадрів визначали висоту і довжину підскоку бульб при варіюванні швидкості елеватора за допомогою змінних зірочок та діаметру роликів. В результаті обробки дослідних даних у програмі STATISTICA-8 було отримано рівняння регресії. Висота підскоку бульб представлена наступним рівнянням [19].:

$$H = 5,9889 + 1,5 \cdot V + 1,5 \cdot D - 1,3333 \cdot V^2 - 0,275 \cdot V \cdot D - 1,8333 \cdot D^2 \quad 3.1$$

де V – швидкість елеватора;

D – діаметр ролика.

Рисунок 3.3 – Розкадрування траєкторії руху бульб при підскоку на комбінованих прутках.

Оцінка достовірності отриманих результатів проводилася з довірчою ймовірністю 95%, коефіцієнт детермінації становив $R^2=0,96485432$, коефіцієнт регресії $R=0,98226998$. Найбільш значущим фактором рівняння регресії є швидкість елеватора, діаметр ролика не має суттєвого впливу на величину підскоку бульб.

Рисунок 3.4 – Залежність висоти підскоку бульби від швидкості полотна елеватора та діаметра ролика

Аналізуючи Рисунок 3.4 можна зробити висновок, що максимальна дія комбінованого прутка на бульбу відбувається при швидкості елеватора 2,1-2,2 м/с, вплив діаметра ролика не має суттєвого значення, тому його величину вибираємо виходячи з найбільш поширених розмірів для сепараторів 0,1 м.

Довжина підскоку (дальність польоту) бульб представлена наступним рівнянням:

$$L = 26,1333 + 6,8333 \cdot V - 0,4833 \cdot D - 5,4 \cdot V^2 - 1,275 \cdot V \cdot D - 0,15 \cdot D^2 \quad 3.2$$

де V – швидкість елеватора;

D – діаметр ролика.

Оцінка достовірності отриманих результатів проводилася з довірчою ймовірністю 95%, коефіцієнт детермінації становив $R^2=0,98251796$, коефіцієнт регресії $R=0,99122044$. Найбільш значущим фактором рівняння регресії є швидкість елеватора, діаметр ролика не має суттєвого впливу на величину підскоку бульб.

Рисунок 3.5 – Залежність довжини (дальність польоту) підскоку бульби від швидкості полотна елеватора та діаметра ролика.

Аналізуючи рисунок 3.5 можна бачити, що максимальна дія комбінованого прутка на бульбу (дальність польоту) відбувається при швидкості елеватора 2,1-2,2 м/с, вплив діаметра ролика не має суттєвого значення, тому його величину вибираємо виходячи з найбільш поширених розмірів для сепарувальних елеваторів 0,1 м.

Для оцінки ефективності гасіння швидкості бульб під час падіння на комбіновані прутки проведено серію експериментів. У ході експериментів варіювалися початкова швидкість бульби, напрям руху бульби, кут нахилу полотна елеватора, відскок бульби фіксували по висоті та довжині. В результаті обробки дослідних даних у програмі STATISTICA -8 було отримано рівняння регресії. Висота відскоку бульб представлена наступним рівнянням:

$$S_h = 3,2222 - 0,6111 \cdot \gamma + 4,0000 \cdot u_1 - 65,9500 \cdot \varepsilon + 6,5000 \cdot u_1 \cdot \varepsilon - 1,0833 \gamma \cdot u_1 - 0,0833 \cdot \gamma \cdot \varepsilon + 2,5000 \cdot \gamma^2 + 0,3333 \cdot u_1^2 + 62,9797 \cdot \varepsilon^2 \quad 3.3$$

де u_1 - початкова швидкість бульби, м / с;

γ – напрямок руху бульби, град;

ε – кут нахилу полотна елеватора, град.

Аналіз адекватності рівняння досвідченим даним показав, коефіцієнт детермінації $R^2=0,782$, значимість всіх чинників варіювання висока.

Аналогічне рівняння отримано для довжини відскоку бульб:

$$S_l = 15,1852 - 0,5000 \cdot \gamma + 8,6111 \cdot u_1 - 59,0353 \cdot \varepsilon + 8,6667 \cdot u_1 \cdot \varepsilon + 0,3333 \gamma \cdot u_1 + 4,0833 \cdot \gamma \cdot \varepsilon - 0,3889 \cdot \gamma^2 - 6,0556 \cdot u_1^2 + 62,9797 \cdot \varepsilon^2 \quad 3.4$$

де u_1 - початкова швидкість бульби, м / с;

γ – напрямок руху бульби, град;

ε – кут нахилу полотна елеватора, град.

Аналіз адекватності рівняння відповідно дослідним даним показав, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.771$, значимість всіх факторів варіювання висока.

На підставі отриманих дослідних даних було побудовано графіки залежностей висоти та довжини відскоку від різних факторів (рисунки 3.6-3.9). Аналіз залежностей відскоку бульб показав, що найбільше значення має чинник – початкова швидкість бульби до зіткнення з поверхнею елеватора з комбінованими прутками.

На рисунку 3.6 видно, що довжина відскоку бульб визначається початковою швидкістю бульби до зіткнення, також суттєво впливає кут нахилу полотна елеватора з комбінованими прутками.

При цьому раціональне значення довжини відскоку близько 0,15 м спостерігається при початковій швидкості бульби 2,1 м/с і куті нахилу полотна елеватора 21° .

Рисунок 3.6 – Залежність довжини відскоку бульби від початкової швидкості бульби та кута нахилу пруткового полотна елеватора

На рисунку 3.7 видно, що висота відскоку бульб визначається початковою швидкістю бульби до зіткнення, також суттєво впливає кут нахилу полотна елеватора з комбінованими прутками.

При цьому раціональне значення висоти відскоку близько 0,06 м спостерігається при початковій швидкості бульби 2,2 м/с і куті нахилу полотна елеватора 22°.

Таким чином, мінімальні значення відскоку бульби спостерігаються в діапазоні раціональних значень початкової швидкості бульби 2,1-2,2 м/с та куті нахилу полотна елеватора 21°-22°.

Рисунок 3.7 – Залежність висоти відскоку бульби від початкової швидкості бульби та кута нахилу пруткового полотна елеватора

На рисунку 3.8 видно, що довжина відскоку бульб визначається кутом нахилу пруткового полотна елеватора, і меншою мірою на довжину відскоку впливає кут напрямку руху бульби. При цьому раціональне значення довжини відскоку близько 0,10 м спостерігається при куті нахилу полотна елеватора 25° куті напрямку руху бульби 20°.

На рисунку 3.9 видно, що висота відскоку бульб визначається кутом нахилу пруткового полотна елеватора, і в меншій мірі на висоту відскоку впливає кут напрямку руху бульби. При цьому раціональне значення висоти відскоку менше 0,06 м спостерігається при куті нахилу полотна елеватора 20°

Рисунок 3.8 – Залежність довжини відскоку бульби від кута напрямку руху бульби та кута нахилу пруткового полотна елеватора.

куті напрямку руху бульби 25° . Таким чином, мінімальні значення відскоку бульби менше 0,06 м спостерігаються в діапазоні раціональних значень: куті нахилу полотна елеватора $20-25^\circ$ куті напрямку руху бульби $20-25^\circ$.

Рисунок 3.9 – Залежність висоти відскоку бульби від кута напрямку руху бульби та кут нахилу пруткового полотна елеватора.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що найбільшу значимість має фактор – початкова швидкість бульби до зіткнення з поверхнею елеватора з комбінованими прутками.

Мінімальні значення висоти відскоку менше 0,06 м та довжини відскоку бульби близько 0,10 м спостерігаються в діапазоні раціональних значень: куті нахилу полотна елеватора 20-25° куті напрямку руху бульби 20-25°.

3.3. Висновки по 3 розділу

1. Експериментальними дослідженнями встановлено, що максимальна дія комбінованого прутка на бульбу відбувається при швидкості елеватора 2,1-2,2 м/с, вплив діаметра ролика не має суттєвого значення, тому його величину вибираємо виходячи з найбільш поширених розмірів для сепаруючих елеваторів 0,1 м.

2. Експериментальними дослідженнями встановлено, що при зіткненні бульби з комбінованими прутками найбільшу значимість має фактор – початкова швидкість бульби до зіткнення з поверхнею елеватора з комбінованими прутками. Мінімальні значення висоти відскоку менше 0,06 м і довжини відскоку бульби близько 0,10 м спостерігаються після зіткнення з комбінованими прутками в діапазоні раціональних значень: початкової швидкості зіткнення не більше 2,1 м/с, куті нахилу полотна елеватора 20-25° і куті напрямку руху бульби 20-25°.

4. Польові дослідження картоплезбиральних машин, оснащених елеватором з комбінованими прутками.

4.1. Програма дослідження.

При проведенні польових досліджень обрано наступну програму [19]:

1 – визначення функціональних та експлуатаційно-технологічних показників серійних та вдосконалених картоплезбиральних машин (на прикладі картоплекопача КТН-2В);

2 – дослідження роботи вдосконаленого пруткового елеватора.

4.2. Об'єкт дослідження та обладнання.

В якості об'єкта досліджень було обрано технологічний процес збирання картоплі картоплекопачем КТН-2В, оснащеним першим прутковим елеватором з комбінованими прутками. За основу порівняння взято процес збирання картоплі із застосуванням серійного картоплекопача КТН-2В.

Картоплезбиральна машина для проведення досліджень - серійний та модернізований картоплекопач КТН.

При проведенні експериментальних досліджень в умовах господарства одночасно з агротехнічною оцінкою, визначенням якісних показників роботи, технологічних показників експериментального робочого органу, вивчався також процес сепарації ґрунтово-картопляного вороху.

Відповідно до методики при агротехнічній оцінці роботи експериментального робочого органу докладно вивчалися умови проведення досліджень. При проведенні досліджень використовувалося стандартне обладнання, що застосовується при агротехнічній та експлуатаційно-технологічній оцінці, а також оцінці показників надійності машин для збирання картоплі відповідно до діючих ДСТУ, провідних організацій у сфері випробувань машин для сільського господарства (УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого).

4.3. Методика дослідження

Дослідження проводилися за загальновідомою методикою [19]. «Характеристика культури картоплі оцінювалася на дослідній ділянці, призначеній для проведення агротехнічної оцінки. Дослідження проводили на п'яти майданчиках завдовжки 14,3 м. кожна. Ширина кожного майданчика прийнята рівною двом рядкам, або 1,5 м.», «Візуально визначали біологічну зрілість бульб та бадилля, чисельно оцінювали врожайність бульб та рослинних домішок, характеристики бульбоносного гнізда» [19].

Урожайність бульб (біологічна) оцінювалася відповідно до методики [19]. «На всіх майданчиках, з обох грядок, викопували кущі картоплі, відокремлювали рослинні залишки від коренебульбоплодів.

Зважування роздільно здійснювалося на терезах з точністю ± 10 г. Біологічна врожайність бульб [19]:

$$Y_6 = \frac{q_6 n}{10^3}, \quad 4.1$$

де Y_6 – біологічна врожайність бульб, т/га;

n – кількість кущів на гектарі, тис. шт.;

q_6 - середня маса бульб з одного куща, кг.

Глибина залягання бульбоносного гнізда оцінювалася положенням верхньої та нижньої бульби. Вимірювання проводили стандартною лінійкою визначали лінійний розмір від верхньої кромки рейки, розміщеної на рядку, до верхньої точки верхнього і нижньої точки нижньої бульби.

Характеристики гнізда, і ширина, і глибина оцінювалися одночасно.

Ширина бульбоносного гнізда визначалася лінійним вимірюванням відстані від протилежних крайніх зовнішніх точок бульб, проводилося підкопування кожного 2-го куща в одному з двох рядків, відведених під майданчик.

Коренебульбоплоди, отримані на експериментальних майданчиках, перемішували. Далі відбирали середню пробу (двісті бульб) і по кожному з

двохсот зразків проводили вимірювання розмірних (довжину, ширину, товщину) та вагових (вагу) характеристик. Точність оцінки ваги не перевищувала ± 1 г, точність оцінки розмірних характеристик трохи більше ± 1 мм. Далі розподіл бульб здійснювався так:

- перша група - 20 - 50 грам;
- друга група - 50 ... 80 грам;
- третя група – понад 80 грам.

У процесі дослідження процесу збирання із застосуванням картоплезбиральної машини досліджувану ділянку поділяли на частини. Стандартна методика передбачає 4 ділянки, кожна довжиною десять метрів, ширина – два рядки (для дворядного картоплекопача). Відбір проб від машин проводили з облікових ділянок на режимі, що встановився, в спеціальні пробовідбірники.

Початок і кінець досліду визначали сигналом, що подається на початку та в кінці облікової ділянки. Тривалість досліду фіксувалася за допомогою секундоміра одночасно з подачею сигналу. Швидкість руху агрегату визначалася за формулою:

$$V_p = \frac{S}{t}, \quad 4.2$$

де V_p – робоча швидкість агрегату, м/с;

S - пройдений шлях, м;

t - тривалість проходження, с.

Змінну експлуатаційну продуктивність картоплекопача визначали з виразу [18]:

$$W_{зм} = 0,1 \cdot B_p \cdot V_p \cdot T_{зм} \cdot \tau, \quad 4.3$$

де $W_{зм}$ – продуктивність картоплекопача за зміну, га/см;

B_p – робоча ширина захвату, м;

$T_{зм}$ - час зміни, год;

τ – коефіцієнт використання часу зміни.

Враховували повноту збирання бульб. На ділянках після проходження картоплекопача збирали бульби, залишені у ґрунті [18]. При визначенні втрат (засипаних і непідкопаних) ділянки перекопувалися на глибину ходу підкопувальних органів машини плюс 2 см. Втрати за видами збирали в тару, зважували, обчислювали масову частку кожного виду втрат від загальної маси бульб на обліковій ділянці. Для визначення пошкодження від кожної повторності чистих бульб відбирали бульби масою більше 50 г для аналізу на пошкодження.

Маса середньої проби не менше ніж 15 кг. При аналізі бульби ділилися на дві фракції: цілі та ушкоджені. На пошкоджених бульбах у день відбору проб враховували такі види ушкоджень:

- здерта шкірка від 14 до 12 поверхні бульби;
- здерта шкірка понад 12 поверхні бульби;
- вибив м'якоті глибиною понад 5 мм;
- тріщини довжиною понад 20 мм;
- розрізи та надрізи;
- роздавлені бульби.

Якщо на бульбі було кілька однотипних ушкоджень, то враховували кожне з них. Цілі та пошкоджені бульби зважували та вважали, після чого обидві партії закладалися на зберігання. Після зберігання визначали потемніння м'якоті. Для цього бульби розрізалися перпендикулярно до поздовжньої осі на часточки товщиною 3 мм:

- при різанні бульб з партії пошкоджених враховувалася лише кількість вогнищ з потемнінням м'якоті на глибину понад 5 мм;

- при різанні бульб з партії непошкоджених, крім обліку вогнищ з потемнінням м'якоті пробу ділили на дві групи: цілі та бульби з потемнінням м'якоті; обидві партії зважували, вважали кількість бульб із цієї та іншої групи. Зважування проводилося на терезах з похибкою ± 10 г. Для встановлення абсолютно неушкоджених бульб масу і кількість бульб з потемнінням, виявленим при різанні партії неушкоджених бульб, віднімали з цієї партії і

додавали до пошкоджених бульб, отриманих у день відбору проб.

Для отримання середнього показника ступеня пошкодження бульб виконували перелік випадків різних видів пошкоджень, виявлених на бульбах даної проби, на умовне число в 100 бульб за формулою [18]:

$$n_n = \frac{n_c}{n_k} \cdot 100, \quad 4.4$$

де n_n - число пошкоджень на 100 бульб, шт;

n_c - кількість випадків того чи іншого виду ушкоджень з аналізу проби, шт;

n_k – кількість бульб у пробі, прим.

4.4. Результати дослідження

Польові випробування проводились у серпні в період збирання картоплі 2023 року. На прутки першого елеватора картоплекопача КТН-2В були встановлені поліетиленові трубки внутрішнім діаметром 25 мм із товщиною стінки 2 мм, а під верхню гілку полотна елеватора змонтовані ролики. Польовим дослідженням передувала агротехнічна оцінка ділянок щодо випробувань. Картоплекопач з експериментальним робочим органом оцінювали за експлуатаційними та агротехнічними показниками із серійною моделлю картоплекопача КТН-2В.

Загальний вигляд експериментального картоплекопача КТН-2В та вигляд елеватора з комбінованими прутками представлені на рис. 4.1 та 4.2.

Переобладнання картоплекопача елеватором з комбінованими прутками: монтаж та демонтаж поліетиленових трубок може проводитись у польових умовах. Трубки мають поздовжній розріз для зручності монтажу, який не має значного впливу на міцність і жорсткість трубок. Поліетиленові трубки довжиною 0,29 м сприяють розподілу бульбоносного шара як вздовж, так і впоперек елеватора при взаємодії з роликами, розташованими під полотном елеватора. Ролики розташовані на відстані 0,30 м уздовж повної

елеватора і по краях трубок у шаховому порядку. Розподіл роликів під полотном елеватора дозволяє впливати на бульбоносний шар: спочатку підкидаючи його від центру грядки, а потім навпаки, сприяю переорієнтації компонентів та сепарації ґрунту. Вільно встановлені на прутках поліетиленові трубки можуть обертатися, збільшуючи швидкість сепарації в просвітах між прутками, або хитатися при ударах по них бульб, погашаючи швидкість і знижуючи кінетичну енергію удару.

Рисунок 4.1 – Загальний вигляд експериментального картоплекопача КТН-2В

Рисунок 4.2 – Вигляд сепаратора, з комбінованими прутками на картоплекопачі КТН-2В

Збільшена площа контакту поліетиленових трубок з бульбами і низький коефіцієнт тертя знижують ймовірність пошкодження бульб. Польові дослідження показали, що картоплекопач КТН-2В, обладнаний елеватором з комбінованими прутками, забезпечує працездатність на важких суглинистих ґрунтах різної вологості. Трубки комбінованих прутків, взаємодіючи з роликками, виключають скочування бульб. Бульби та компоненти бульбоносного шару менше стикаються один з одним, що зменшує пошкодження бульб.

Польові дослідження проводилися на важкому суглинному ґрунті нормальної вологості близько 21% (темно-сірий лісовий). Порівняння роботи серійного картоплекопачу та картоплекопача, обладнаного елеватором з комбінованими прутками показали високу ефективність сепарації ґрунту. Втрати бульб, присипаних ґрунтом після проходу картоплекопача, обладнаного елеватором з комбінованими прутками, зменшилися до 3,0% порівняно з серійним картоплекопачем, у якого аналогічні втрати склали 8,3%. Пошкодження бульб на картоплекопачі, обладнаному елеватором з комбінованими прутками склали 1,9%, тоді як на серійному картоплекопачі КТН-2В - 2,7%, що в 1,42 рази більше. Результати польових досліджень показали ефективність функціонування елеватора з комбінованими прутками в конструкції картоплезбиральних машин і його досить високу технологічну надійність.

4.5. Висновки до 4 розділу.

1. Картоплекопач, обладнаний елеватором з комбінованими прутками, показав високу ефективність сепарації ґрунту в порівнянні з серійним картоплекопачем. Зниження втрат бульб, присипаних ґрунтом після проходу картоплекопача, обладнаного елеватором з комбінованими прутками, зменшилися до 3,0% порівняно із серійним картоплекопачем, у якого аналогічні втрати склали 8,3%.

2. Пошкодження бульб на картоплекопачі, обладнаному елеватором з комбінованими прутками, склали 1,9%, що в 1,42 рази менше порівняно з серійним картоплекопачем КТН-2В.

3. Результати польових досліджень показали ефективність функціонування елеватора з комбінованими прутками в конструкції картоплезбиральних машин, та його досить високу технологічну надійність.

ВИСНОВОК

1. Встановлено, що діаметр ролика впливає на величину швидкості центру трубки, раціональним значенням діаметра ролика є значення 0,010 м. Зі збільшенням діаметра трубки комбінованого прутка зменшується швидкість центру трубки, а також зменшується коефіцієнт живого перерізу решета. Тому слід вибирати менше значення діаметра трубки, діаметр трубки 0,0125 м є раціональним. Встановлено, що раціональна довжина трубки комбінованого прутка складає 0,25-0,30 м.

2. Аналіз траєкторії руху (польоту) компонентів картопляного вороху відносно елеватора дозволив встановити, що дальність польоту компонентів вздовж і поперек елеватора становить близько 0,25-0,35 м, при цьому висота траєкторії дещо менша при поперечному русі і не перевищує 0,06м.

3. Експериментальними дослідженнями встановлено, що максимальна дія комбінованого прутка на бульбу відбувається при швидкості елеватора 2,1-2,2 м/с, вплив діаметра ролика не має суттєвого значення, його величину приймаємо 0,10 м, при зіткненні бульби з комбінованими прутками найбільшу значимість має чинник «початкова швидкість бульби до зіткнення з поверхнею елеватора з комбінованими прутками». Мінімальні значення висоти відскоку спостерігаються після зіткнення з комбінованими прутками в діапазоні раціональних значень: початкової швидкості зіткнення не більше 2,1м/с, куті нахилу полотна елеватора 20-25° і куті напрямку руху бульби 20-25°.

4. Картоплекопач, обладнаний елеватором з комбінованими прутками, показав високу ефективність сепарації ґрунту в порівнянні з серійним картоплекопачем. Зниження втрат бульб, присипаних ґрунтом після проходження картоплекопача, обладнаного елеватором з комбінованими прутками, зменшилися до 3,0% порівняно з серійним картоплекопачем, у якого аналогічні втрати склали 8,3%. Ушкодження бульб на картоплекопачі, обладнаному елеватором з комбінованими прутками, склали 1,9%, що в 1,42 рази менше порівняно з серійним картоплекопачем КТН-2В.

Список використаної літератури

1. Рудь А.В., Бендера І.М., Войтюк Д.Г. та ін. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва: підруч. у 2 т: Т 1. Київ: Агроосвіта, 2012. 584 с.
2. Калетнік Г.М., Чаусов М.Г., Бондар М.М. та ін. Машина та обладнання в сільськогосподарській меліорації: підручник. Київ : Хай-ТекПрес, 2011. 488 с.
3. Ільченко В.Ю., Кобець А.С., Мельник В.П., Карасьов П.І., Кухаренко П.М. Практикум з використання машин у рослинництві. Дніпропетровськ: ДДАУ, 2002. 212 с.
4. Погорілий С.О., Молоцький М.Я. Технологія вирощування картоплі в Лісостепу України: Монографія. Біла Церква: БДАУ, 2007. 164 с.
5. Гарькавий А.Д., Калетнік Г.М., Мельник І.І., Лихочвор В.В., Кондратюк Д.Г. Машиновикористання у рослинництві. Технологічний регламент використання машин у рослинництві: навч. посіб. Вінниця: ВДАУ, 2009. 160 с.
6. Кобець А.С., Іщенко Т.Д., Волик Б.А., Демидов О.А. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: навчальний посібник. Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2009. 84 с.
7. Кононученка В.В., Молоцького М.Я. Картопля. Т. 1. Біла Церква, 2002. 536 с.
8. Настенко П.М. Технологія виробництва картоплі. Київ: Урожай, 1975. 165 с.
9. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини. Київ: Урожай, 1994. 346 с.
10. Калетнік Г.М., Чаусов М.Г., Швайко В.М., Пришляк В.М. та ін. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Ч.ІІІ : підручник. Київ : Хай-Тек Прес, 2013. 528 с.
11. Теслюк П.С., Молоцький М. Я. Практичний poradник картопляра. Київ, 1999. 258 с.

12. Єщенко В.О., Копитко П.Г., Опришко В.П., Костогриз П.В. Основи наукових досліджень в агрономії: підручник. Київ: Дія, 2005. С. 82
13. Закон України «Про державну підтримку сільського господарства України». *Відомості Верховної Ради*. № 49. Ст. 527. 2004.
14. Шевченко І.А. Обґрунтування технологій та технічних засобів для обробітку ґрунтів на базі їх агрофізичних показників: Дис... докт. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, 2003. 403 с.
15. Паламарчук В.Д., Поліщук І.С., Мазур В.А., Паламарчук О.Д. Новітні агротехнології у рослинництві: підручник. Вінниця, 2017. 602 с.
16. Дзюби В.І., Батюти В.Г. Операційна технологія виробництва картоплі. Київ: Урожай, 1987. 197 с.
17. Czyz E.A., Dexter A.R., Niedzwiecki J. Wplyw zawartosci ilu koloidalnego i substancji organicznej oraz gestosci objetosciowej na przewodnosc hydrauliczna nasyciona i nienasyciona warstwy ornej gleb. *IBMER*. Warszawa, 2002. S. 101-109.
18. Лисогор В.М., Єленіч М.П., Паладійчук Ю.Б. Методологія та організація наукових досліджень в агропромисловому комплексі: монографія.; ред. Г.М. Калетнік; ВНАУ. Вінниця: Меркьюрі-Поділля, 2013. 279 с.
19. Ковязин О.С. Методика проведення експериментальних досліджень лемішнобарабанного сепаратора ґрунту. *Праці ТДАТА*. 2005. Вип. 28. С. 152-157.
20. Козаченко Б.О., Кононученко В.В. Механізація виробництва картоплі: Довідник. Київ: Урожай, 1991. 176 с.
21. Головчук А.Ф., Марченко В., Орлов В.Ф. Експлуатація та ремонт сільськогосподарської техніки: підручник «Машини сільськогосподарські» Кн. 3. Київ: «Грамота», 2005. 576 с.
22. Шевченко І., Ткачук В., Курко А. Ротаційний сепаруючий робочий орган картоплезбиральної машини: Патент № 37836А. Україна 17.07.2001. Бюл. № 6. 4 с.

23. Шевченко І.А., Ковязин О.С. Обґрунтування максимально можливої продуктивності пруткового двобарабанного сепаратора ґрунту. *Праці ТДАТА*. Вип. 21. 2004. С. 188-197.

24. Шевченко І.А., Ткачук В.С. Фізико-механічні властивості ґрунту і картоплі, які визначають технологічний процес роботи картоплезбиральних машин. *Праці ТДАТА. Вип. 1. Т. 16*. 2000. С. 124-131.

25. Молоцький М.Я., Бондарчук А.А. Поради картопляру-аматора. Біла Церква, 2005. 168 с.

26. Труханська О.О. Підвищення якості ремонту і технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 3. С. 109-119.

27. Ciecko Z., Cwojdzinski W., Czuba R., Gorlach E., Grzebisz W., Grzeskowiak A., Kaminski E. Nawozenie mineralne rowlin uprawnych. Szczecin: Police, 1996. 413 s.

28. Типові норми виробітку і витрачання палива на механізовані польові роботи. Київ: Урожай, 1991. 472 с.

29. Українська асоціація виробників картоплі. URL: <http://www.potatoclub.com.ua/>

30. Серета Л.П., Швець Л.В., Гунько І.В., Пришляк В.М. Методичні рекомендації написання та оформлення дипломних робіт для студентів денної та заочної форм навчання факультету механізації сільського господарства освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр». Вінниця: ВНАУ. 2015. 23 с.

31. Веселовська Н. Р., Руткевич В. С., Шаргородський С. А. Технологічні основи сільськогосподарського машинобудування: навч. посіб. Вінниця: Твори, 2019. 234 с.