

Центральноукраїнський національний технічний університет
Агротехнічний факультет
Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“___” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:

Модернізація сівалки VESTA 8 PROFI з удосконаленням посівної
секції

Виконав здобувач вищої освіти IV
курсу, групи ГМ-22-1

ОПП «Галузеве машинобудування»

спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Орел Віталій Анатолійович

«___» _____ 2026 р.

Керівник проекту

доц., канд. техн. наук

_____ Дмитро БОГАТИРЬОВ

«___» _____ 2026 р.

Рецензент

доц., канд. техн. наук

_____ Максим ГОДУНКО

«___» _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Агротехнічний

Кафедра Сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо-професійна програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« » 2026 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Орел Віталій Анатолійович

1. Тема роботи: «Модернізація сівалки VESTA 8 PROFI з удосконаленням посівної секції»
 2. Керівник роботи Богатирьов Д.В., к.т.н., доцент
 3. Строк подання студентом роботи до захисту 05.06.2026
 4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи модернізація сівалки VESTA 8 PROFI, яка в цілому направлена на підвищення продуктивності і якості процесу посіву, особливо внесення туків.
 5. Перелік графічного матеріалу 1. Сівалка – складальне креслення; 2. Сошник – складальне креслення; 3. Деталювання.
- Всього 3 аркуші формату A1.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-6	Богатирьов Д.В., доцент, к.т.н.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання про машину, яка підлягає модернізації з визначенням шляхів її покращення	25.05.26 р.	
2	Конструкторська частина	30.05.26 р.	
3.	Виконання графічної частини	05.06.26	
4.	Нормоконтроль, рецензування, захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК кафедри СГМ	Згідно графіку	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника

_____ Богатирьов Д.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача

_____ Орел В.А.
(прізвище та ініціали)

Анотація

У кваліфікаційній роботі науково обґрунтовано інженерне рішення щодо підвищення параметричної стабільності та якості дискретно-точного розподілу насіння просапних культур. Об'єктом дослідження є технологічний процес взаємодії робочих органів посівної секції сівалки VESTA 8 PROFІ з ґрунтовим середовищем. На основі кінематичного аналізу ліквідовано обертальний ступінь вільності грудковідкидача шляхом його жорсткої фіксації до кронштейна копіювального котка під кутом $\alpha=160^0-180^0$, що повністю нівелює бульдозерний ефект акумуляції ґрунту. Оптимізовано внутрішню геометрію напрямного каналу сошника для стабілізації траєкторії руху насіння, усунення його відскоку та забезпечення рівномірної глибини заробки. Розраховано показники економічної ефективності від упровадження модернізованої конструкції.

Ключові слова: посівна секція, сівалка VESTA 8 PROFІ, грудковідкидач, наральниковий сошник, параметрична стабільність, точне землеробство.

Abstract

In the qualification framework, an engineering solution is scientifically substantiated to increase the parametric stability and quality of the discrete-precise distribution of row crop seeds. The object of the study is the technological process of interaction of the sowing section working organs of the VESTA 8 PROFІ seed drill with the soil medium. Based on the kinematic analysis, the rotational degree of freedom of the clod remover was eliminated by its rigid fixation to the gauge wheel bracket at an angle of $\alpha=160^0-180^0$, which completely negates the bulldozer effect of soil accumulation. The internal geometry of the furrow opener guide channel has been optimized to stabilize the seed movement trajectory, eliminate seed bounce, and ensure uniform seeding depth. The indicators of economic efficiency from the introduction of the modernized design are calculated.

Keywords: sowing section, VESTA 8 PROFІ seed drill, clod remover, runner furrow opener, parametric stability, precision agriculture.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний вектор інтенсифікації агропромислового виробництва базується на парадигмі прецизійного землеробства (Precision Agriculture), яка регламентує оптимізацію просторово-дискретного позиціонування насіннєвого матеріалу в гетерогенному ґрунтовому середовищі. Ключовим детермінантом біопродуктивності агрофітоценозів є забезпечення однорідності архітектоніки посіву, що безпосередньо корелює з фізико-механічними та реологічними властивостями насіннєвого ложа. Нерівномірність просторового розподілу та незадовільна глибина заробки насіння зумовлюють виникнення критичних градієнтів вологозабезпеченості, зниження енергії гермінації та стохастичний характер реалізації репродуктивного потенціалу культур.

Конструктивно-технологічний аналіз сучасних посівних комплексів свідчить, що функціональна надійність сошникових груп та пристроїв підготовки посівного ложа суттєво обмежується динамічними збуреннями, викликаними стохастичним макро- та мікрорельєфом агрофізичного фону. Саме тому моделювання, параметрична оптимізація та адаптивно-конструктивна модернізація посівних секцій, спрямовані на стабілізацію геометричних параметрів робочої борозни та мінімізацію деструктивного ущільнення ґрунту в зоні проростання, визнані світовим пріоритетом у сфері сільськогосподарської інженерії.

На вітчизняному ринку сільськогосподарської техніки високим рівнем універсальності характеризується пневматична просапна сівалка VESTA 8 PROFI виробництва ПАТ «Ельворті». Проте досвід її реального експлуатаційного профілю виявив конструктивно-кінематичну недосконалість елементів адаптації посівної секції. Зокрема, спостерігається кінематична нестабільність переднього опорно-прикочуючого котка,

					ВЕСТА 00.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.	Орел				Пояснювальна записка				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.	Богатирьов										5	40
									ЦНТУ, гр. ГМ-22-1			
Н. контр.	Артеменко											
Затв.	Васильковський											

оснащеного шарнірним грудковідкидачем. Внаслідок дефіциту жорсткості зв'язку при копіюванні мікрорельєфу поля відбувається неконтрольоване кутове зміщення (провертання) грудковідкидача навколо осі шарніра, що трансформує його режим роботи з чистого скошування мікропідвищень у режим бульдозерного зсуву та акумуляції ґрунтового масиву поперед наральникового сошника. Це ініціює флуктуації глибини борозни та деструкцію її стінок.

Додатковим дестабілізуючим фактором є порушення кінематики траєкторії дискретного руху насінин, що призводить до їх стохастичного відскоку та осадження на п'ятку сошника замість безпосередньої фіксації на щільному капілярному ложі. Усунення зазначених деструктивних явищ шляхом жорсткої інтеграції грудковідкидача з рамною конструкцією котка у фіксованому кутовому діапазоні ($\alpha = 160^0\text{-}180^0$ відносно лінії горизонту) та оптимізації геометрії ложеутворювача є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення параметричної надійності посівних машин.

Мета роботи – підвищення параметричної стабільності та якості функціонування технологічного процесу дискретно-точного розподілу насіння просапних культур шляхом конструктивно-кінематичної модернізації посівної секції сівалки VESTA 8 PROFI з обґрунтуванням геометрії робочих органів ложеутворення та грудковидалення.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

Здійснити системний аналіз та дескриптивне моделювання сучасних світових тенденцій розвитку та патентно-ліцензійних рішень у сфері прецизійного сошникобудування.

Розробити аналітичні математичні моделі та провести теоретичне обґрунтування взаємодії модернізованого жорсткого грудковідкидача та сошникового вузла з деформаційним ґрунтовим середовищем з визначенням їх оптимальних кінематичних і геометричних параметрів.

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		6

Розробити комплексну конструкторську та проектно-технічну документацію на вдосконалену архітектуру посівної секції сівалки VESTA 8 PROFІ.

Провести техніко-економічну оцінку та розрахувати показники прагматичної ефективності від інтеграції запропонованих конструктивних інновацій у виробництво.

Об'єкт дослідження – динамічний процес взаємодії робочих органів посівної секції з гетерогенним ґрунтовим середовищем та насіннєвим матеріалом при його дозованому розподілі та заробці.

Предмет дослідження – конструктивно-кінематичні, геометричні та реологічні закономірності функціонування модернізованого наральникового сошника та жорстко зафіксованого грудковідкидального органу опорно-прикочуючого котка посівної секції сівалки VESTA 8 PROFІ.

Практичне значення одержаних результатів. Обґрунтовано просторово-геометричну конфігурацію жорсткого кріплення робочого органу грудковидалення у кутовому інтервалі $\alpha = 160^0-180^0$ до горизонтальної площини, що повністю нівелює бульдозерний ефект акумуляції ґрунту, забезпечує ізотропність глибини заробки дрібнонасіннєвих просапних культур (зокрема, цукрового буряка на стабільну глибину 4...6 см) із формуванням щільного підстиляючого капілярного шару без дестабілізуючого відскоку насіння на конструктивні елементи сошника.

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		7

2. СТАН ПИТАННЯ ПРО МАШИНУ, ЯКА ПІДЛЯГАЄ МОДЕРНІЗАЦІЇ

2.1. Конструктивно-технологічний аналіз базової конфігурації сівалки Vesta 8 Profi

Для реалізації сучасних технологій пунктирного (точкового) висіву просапних і технічних культур в умовах інтенсивного землеробства широкого застосування набула універсальна пневматична сівалка Vesta 8 Profi виробництва компанії Ельворті [1, 5, 27]. Ця машина розроблена для точного дозування каліброваного та некаліброваного насіння з одночасним, просторово розділеним від насіннєвого матеріалу, внесенням мінеральних добрив та локальним прикочуванням ґрунту над засіяними рядками [6, 21].

Конструктивна схема базової машини базується на модульній рамі фермової структури, яка спирається на опорно-приводні пневматичні колеса. Передача крутного моменту до посівних та тукових дозуючих систем здійснюється через механічні редуктори зі змінними передавальними відношеннями [6, 21, 30]. Пневматична система сівалки містить відцентровий вентилятор високотискного повітряного потоку, що приводиться в дію від вала відбору потужності (ВВП) трактора через карданну передачу та пасовий мультиплікатор [2, 10]. Індивідуальні посівні секції інтегровані до несучого бруса рами за допомогою паралелограмних механізмів підвіски, які призначені для пасивного копіювання макрорельєфу поля в межах амплітуди вертикального ходу паралельних ланок деформаційного чотириланкового контуру [1, 14, 26].

Робочий процес посівної секції починається в бункері, звідки насіннєвий матеріал під дією сил гравітації та внутрішнього тертя переміщується до забірної камери вакуумного висівного апарату [3, 21]. За рахунок статичного розрідження (вакууму), яке створюється вентилятором і транспортується через гнучкі повітропроводи, насіння притискається до каліброваних отворів висівного диска, що обертається в герметичній камері [14, 23, 27]. Під час кутового переміщення диска групові ворушилки та механічні або пневматичні відсікачі здійснюють

видалення зайвих насінин (двійників), забезпечуючи поштучне дозування [3, 11, 23]. Після проходження зони відсікання вакуумний тиск екранується спеціальною прокладкою, і насінина, втрачаючи утримувальну силу, під дією власної ваги та кінетичного імпульсу обертання висівного диска спрямовується у вертикальний напрямний канал сошника [1, 21, 30].

Утворення посівної борозни, формування ущільненого насінневого ложа, укладання насіння та його фінішне покриття пухким шаром ґрунту здійснює комбінований робочий орган посівної секції. Відповідно до базової конструкторської схеми, секція сівалки Vesta 8 Profi містить такі послідовно розташовані елементи [1, 6, 30]:

- індивідуальний полімерний насінневий бункер місткістю 36 дм³;
- пневматичний висівний апарат вакуумного типу з механізмом швидкого спорожнення;
- наральниковий (кілеподібний) сошник з інтегрованим насіннепроводом;
- передній опорно-копіювальний коток, обладнаний шарнірним грудковідкидачем;
- задній дворядний двоколісний V-подібний прикочуючий коток із регулюванням зусилля притискання;
- планчастий шлейф для руйнування поверхневої кірки та вирівнювання рельєфу засіяного рядка;
- гвинтовий механізм з тарованою пружиною для безступінчастого регулювання заглиблення секції та зусилля копіювання.

Стабільність глибини заробки насінневого матеріалу визначається взаємним вертикальним положенням опорного котка та нижньої робочої кромки щок наральникового сошника [1, 13, 21]. Проте результати польових експлуатаційних випробувань, а також науково-практичні дослідження базових моделей сівалок виявили низку системних конструктивно-технологічних недоліків. Ці дефекти негативно впливають на параметричну надійність посіву,

зумовлюючи стохастичний характер розподілу насіння за глибиною та подовжньою координатою рядка [11, 22, 26].

2.2. Аналіз кінематичних та реологічних дефектів функціонування грудковідкидального органу

Першим критичним конструктивним вузлом, що суттєво обмежує якість підготовки ґрунтового профілю перед взаємодією з формотворчим елементом сошника, є передній опорно-копіювальний коток, обладнаний шарнірним грудковідкидачем [6, 21, 26]. Головною агротехнічною функцією грудковідкидача є механічне розсунення та відведення великих сухих грудок ґрунту, рослинних решток і стерні з лінії проходження сошника. Це необхідно для стабілізації вертикальних коливань секції та виключення защемлення органіки в посівній борозні, що заважає нормальному контакту насінини з вологим ґрунтом [1, 12, 13].

У базовому варіанті конструкції посівної секції робоча пластина грудковідкидача з'єднана з вилкою переднього опорного котка за допомогою циліндричного шарніра, що забезпечує одну лінійну вісь обертання у вертикально-подовжній площині [1, 30]. Такий кінематичний ступінь вільності був закладений проектувальниками з метою пасивного самовстановлення кута атаки та копіювання мікропрофілю поверхні поля залежно від локального фізико-механічного стану ґрунту [6, 21]. Проте практична експлуатація цього кінематичного зв'язку в реальних польових умовах демонструє протилежний ефект [22, 26].

Під час руху посівного агрегату зі швидкостями у діапазоні від 2,2 до 3,0 м/с сошникові групи та копіювальні елементи стикаються зі значним динамічним опором ґрунтового середовища [7, 8]. Сила лобового опору деформації зсуву ґрунту безперервно діє на фронтальну робочу поверхню грудковідкидача, створюючи перекидний крутний момент відносно осі

циліндричного шарніра [9, 15, 17]. При роботі на важких за механічним складом суглинках, перезволожених ґрунтах або фонах із високою щільністю твердої фази, реологічний опір зсуву та скошування значно перевищує момент сил тертя в шарнірному з'єднанні [8, 16, 20].

Це призводить до мимовільного кутового провертання робочої пластини грудковідкидача навколо осі кріплення в напрямку під передній опорний коток [1, 26]. Внаслідок цього просторова орієнтація грудковідкидача радикально змінюється замість зрізання та відведення верхнього сухого шару ґрунту під оптимальним гострим кутом різання, пластина набуває положення, близького до ортогонального відносно лінії руху [6, 21]. У такому положенні робочий орган повністю втрачає свої технологічні функції та починає працювати в режимі бульдозерного відвалу [15, 26].

Бульдозерний ефект супроводжується безперервним накопиченням, зсувом та гравітаційним ущільненням ґрунтового масиву безпосередньо попереду опорного котка та сошника [7, 8]. Це ініціює виникнення низки деструктивних технологічних явищ [12, 13, 26]:

- різке циклічне зростання тягового опору посівної секції, що призводить до нерівномірності ходу всього агрегату та перевитрати палива [8, 17];
- мимовільне виглиблення сошника через наїзд переднього опорного котка на сформований грудковідкидачем ґрунтовий вал, що порушує ізотропність глибини висіву [11, 22];
- періодичне засипання та обвалення стінок робочої борозни пухким ґрунтом ще до моменту падіння насінини з висівного каналу, що унеможливорює точне дотримання глибини посіву [14, 26];
- виникнення знакозмінних динамічних навантажень та високочастотних коливань у паралелограмній підвісці секції, що призводить до прискореного втомного руйнування металоконструкцій та зносу втулок [1, 10].

Для радикального усунення цього кінематичного дефекту виникає об'єктивна інженерна необхідність ліквідації обертового ступеня вільності

грудковідкидача шляхом його жорсткої фіксації до кронштейна копіювального котка [26]. При цьому просторовий кут нахилу модернізованого жорсткого грудковідкидача відносно горизонтальної площини повинен бути аналітично обґрунтований та стабілізований в інтервалі від 160 до 180 градусів [26]. Така конструктивна конфігурація забезпечує чисте зрізання мікропідвищень і відведення грудок без накопичення ґрунтового масиву, стабілізуючи хід посівної секції та умови роботи наральникового сошника.

2.3. Дослідження кінематики руху насіння в сошниковому просторі

Другим критичним фактором, що лімітує агротехнічну ефективність базової посівної секції сівалки Vesta 8 Profi, є недосконала кінематика транспортування насіння після його виходу з висівного апарату [1, 26]. Це призводить до стохастичного відскоку насінин і їх небажаного осідання на металеву п'ятку сошника замість безпосереднього вкладання на щільне дно борозни [6, 26].

Процес просторового переміщення окремої насінини всередині сошникової групи описується законами динаміки матеріальної точки змінної маси, що рухається у гравітаційному полі з урахуванням сил тертя та ударної взаємодії з обмежувальними стінками напрямного каналу [3, 4, 19]. Під час скидання насінини з висівного диска вона володіє початковою швидкістю, вектор якої спрямований по дотичній до траєкторії обертання диска [14, 23]. Ця швидкість геометрично складається з вектором поступальної швидкості руху посівної секції [1, 3].

Внутрішня порожнина наральникового сошника утворює напрямний канал, який у нижній частині закінчується п'яткою сошника – металевим клиноподібним елементом, що розсовує стінки борозни та формує її ущільнене дно [6, 12]. У процесі експлуатації через геометричну невідповідність кута нахилу вихідного патрубку висівного апарату та внутрішнього профілю

сошника виникає явище хаотичного багаторазового відскоку насіння від стінок каналу [3, 19, 24].

Під час гравітаційного падіння насінина стикається з похилими внутрішніми металевими поверхнями сошника під кутами, близькими до ортогональних [3, 26]. Коефіцієнт відновлення швидкості при ударі насінини об сталь є досить високим і коливається в межах від 0,4 до 0,6 залежно від вологості, сорту та стану поверхні насіннєвого матеріалу [4, 19]. Еластичний відскок різко змінює вектор швидкості насінини, внаслідок чого траєкторія її польоту викривляється, спрямовуючи насінину на горизонтальну конструктивну полицю – п'ятку сошника [26].

Осідання та затримка насіння на п'ятці сошника викликає такі негативні агротехнічні наслідки [3, 12, 13, 26]:

- тимчасове зависання насінини на металевій поверхні п'ятки, тривалість якого є випадковою величиною, що повністю дезорганізує заданий інтервал між насінинами в рядку та суттєво підвищує коефіцієнт варіації подовжнього розподілу [23, 24];

- скочування насінини з п'ятки відбувається під дією випадкових вібраційних імпульсів, що виникають від взаємодії сошника з ґрунтом, внаслідок чого насінина потрапляє у борозну із запізненням, коли її стінки вже частково осипалися пухким сухим ґрунтом [14, 26];

- закладання насіння відбувається без безпосереднього контакту з капілярним ложем, оскільки під п'яткою накопичується опадаюча ґрунтова фракція, яка блокує надходження капілярної вологи до насінини, що призводить до затримки появи сходів на 3–5 діб та зниження польової схожості [11, 22].

Для оптимізації кінематичних параметрів руху насіннєвого потоку всередині сошника необхідно скоригувати внутрішню геометрію напрямного каналу та кут нахилу ложеутворювача [26]. Траєкторія руху насінини повинна бути максимально наближена до параболічної кривої без різких ортогональних

зіткнень із конструктивними металевими елементами сошника [3, 24]. Це дозволить спрямовувати насінину за дотичним вектором безпосередньо у найглибшу точку сформованого клина борозни, мінаючи зону п'ятки та забезпечуючи стабільну фіксацію насінини на вологому ущільненому ложі [11, 26].

Таким чином, модернізація посівної секції сівалки Vesta 8 Profi шляхом інтеграції жорсткого грудковідкидача та оптимізації геометрії напрямного каналу сошника є комплексним науково-технічним рішенням, спрямованим на ліквідацію реологічних і кінематичних дефектів посіву, що повністю узгоджується з сучасними стандартами сільськогосподарського машинобудування та концепцією точного землеробства [1, 5, 26].

2.4. Порівняльні ТТХ однотипних сівалок з пневмомеханічними висівними апаратами

Для обґрунтування напрямків модернізації посівної секції універсальної пневматичної сівальної машини Vesta 8 Profi (виробництва ПАТ «Ельворті») необхідно провести комплексний системний аналіз та порівняльне оцінювання тактико-технічних, конструктивно-кінематичних та технологічних параметрів однотипних сівалок просапного класу [1, 6]. У вітчизняній та світовій практиці сільськогосподарського машинобудування для пунктирного висіву просапних культур (кукурудзи, соняшнику, сої, цукрового буряку) застосовують широкий спектр машин, які відрізняються принципом створення розрідження повітря, конструкцією висівних органів, типом сошникової групи, а також кінематичними параметрами систем притискання та копіювання рельєфу [4, 10, 26].

До найбільш поширених базових та класичних моделей вітчизняного виробництва, що історично та технологічно передували або є суміжними з сівалкою Vesta 8 Profi, належать СУПН-8 (сівалка універсальна пневматична навісна), СУПО-6 (сівалка універсальна пневматична овочева) та УПС-8

(універсальна пневматична сівалка) [4, 6, 8]. Як закордонні аналоги для порівняльного аналізу обрано високотехнологічні посівні машини провідних світових брендів, зокрема John Deere 1780 (із висівними системами MaxEmerge) та Monosem NG Plus 4, які є еталонами точного висіву в країнах Європейського Союзу та Північної Америки [22, 23, 24].

2.4.1. Конструктивно-технологічний аналіз порівнювальних посівних систем

Для глибокого аналітичного оцінювання конструкційних відмінностей виділимо базові фізико-механічні принципи функціонування висівних систем кожної з досліджуваних машин:

1. Сівалка СУПН-8: Являє собою базову класичну конструкцію, в якій створення вакууму здійснюється за допомогою ежектора, що працює від вихлопних газів трактора, або від відцентрового вентилятора з приводом від ВВП через карданну передачу [4, 12]. Висівний апарат оснащений плоским диском з отворами, а дозування насіння регулюється механічним шлейфовим відсікачем двійників. Головним обмеженням даної системи є висока залежність стабільності розрідження від обертів двигуна трактора, що зумовлює підвищений коефіцієнт варіації інтервалів між насінинами при зміні швидкості руху агрегату [8, 14]. Сошник – наральникового типу, жорстко з'єднаний з гряділем без індивідуального копіювання кожної секції опорними котками.

2. Сівалка СУПО-6: Спеціалізована машина для висіву дрібнонасінних овочевих культур. Вона відрізняється підвищеними вимогами до точності поштучного відбору [3, 13]. Пневматична система працює виключно за рахунок відцентрового вентилятора підвищеної продуктивності. Висівний апарат містить диск із підкосами та ворухителями оригінальної геометрії, що мінімізує травмування насіння [11]. Сошники – полозоподібні, обладнані двома копіювальними котками на кожну секцію (переднім та заднім), що забезпечує високу точність глибини ходу, але суттєво обмежує роботу на важких за механічним складом ґрунтах і стерньових фонах через забивання

міжсошникового простору [6, 12].

3. Сівалка УПС-8: Конструктивне покоління машин, що безпосередньо передувало лінійці Vesta. Має двоконтурний привод висівних апаратів [6, 30]. Робочий процес реалізує концепцію низького розташування висівного апарату відносно дна борозни, що знижує швидкість вільного падіння насіння всередині сошника. Висівний апарат комплектується гребінчастим скидачем двійників із ручним гвинтовим регулюванням. Сошник – анкерний (дворядний) із туковою насадкою [1, 26]. Копіювання рельєфу здійснюється за допомогою індивідуальних коліс, проте кінематична схема підвіски піддається підвищенням вібраційним навантаженням на швидкостях понад 2,0 м/с [10].

4. Vesta 8 Profi: Сучасна модернізована конструкція компанії «Ельворті». Вона поєднує в собі переваги вакуумної системи висіву з високотехнологічним інтегрованим копіювальним контуром [21, 26]. Секція оснащена паралелограмною підвіскою підвищеної жорсткості, двома незалежними опорно-копіювальними колесами та V-подібними прикочуючими котками з регульованим тиском на ґрунт [6, 30]. Сошник – наральниковий (кілеподібний), з інтегрованим насіннепроводом оптимізованої геометрії. Головною перевагою є використання висівного апарату Profi з окремим механізмом швидкого скидання залишків насіння та точним налаштуванням положення гребінчастого відсікача двійників [26, 27].

5. John Deere 1780: Закордонний аналог преміум-класу. Робочий процес базується на використанні вакуумної дозуючої системи *MaxEmerge XP* або *Pro* [22, 24]. Особливістю є застосування дводіскових сошників із внутрішніми копіювальними колесами *Tru-Vee*, які здійснюють ущільнення ґрунту безпосередньо з боків від точки падіння насіння. Це гарантує максимальну ізотропність глибини висіву на екстремальних швидкостях (до 3,5 м/с) [23, 35]. Привод висівних дисків може бути механічним (через гнучкі вали *Cable Drive*) або повністю електричним [36].

6. Monosem NG Plus 4: Світовий лідер у сегменті прецизійного висіву [28,

43]. Конструкція висівної секції характеризується унікальною системою моноблочної рами з важкою паралелограмною підвіскою та пневмогідравлічним дотисканням. Висівний апарат виготовлений із високоміцних сплавів із застосуванням латунного ущільнювального кільця, що виключає втрати вакууму [28]. Сошник – комбінований дводісково-анкерний з переднім прорізним диском (турбоножем) для роботи за технологіями No-Till та Mini-Till [31, 37].

2.4.2. Системне порівняння тактико-технічних характеристик

Для проведення детального параметричного аналізу зведемо основні технічні, технологічні та конструктивні характеристики досліджуваних машин у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльні ТТХ пневматичних сівалок точного висіву

Параметр порівняння	СУПН-8	СУПО-6	УПС-8	Vesta 8 Profi	John Deere 1780	Monosem NG Plus 4
Тип агрегування	Навісний	Навісний	Навісний	Напівпричипний / Навісний	Причипний / Навісний	Навісний / Причипний
Кількість рядків, шт.	8	6	8	8	8	8
Ширина міжрядь, см	70	45; 60; 70	70	70	70; 75	45; 70; 75
Робоча швидкість, км/год	6–9	5–8	6–10	6–12	8–14	8–12
Продуктивність за 1 год, га/год	3,36–5,04	1,35–2,52	3,36–5,6	3,36–6,72	4,48–7,84	4,48–6,72
Місткість насінневого бункера (загальна), дм³	200	90	200	288	464	416
Місткість тукового бункера (загальна), дм³	192	–	192	320	560	480
Тип висівного апарату	Вакуумний, плоский диск	Вакуумний, з підкосами	Вакуумний, двоконтур	Вакуумний, серія "Profi"	Вакуумний, MaxEmerg	Вакуумний, Monosem

			ний		e	NG
Робоче розрідження (вакуум), кПа	2,0–3,0	3,0–4,5	2,5–3,5	3,0–4,0	3,5–5,5	4,0–6,0
Тип сошника для насіння	Наральниковий (кілеподібний)	Полозоподібний	Анкерний	Наральниковий (кілеподібний)	Дводісковий (Tru-Vee)	Дводісковий з анкером
Тип прикочуючого органу	Одноколісний коток	Одноколісний циліндричний	Одноколісний з ребордою	V-подібний двоколісний	V-подібний регульований	V-подібний чавунний/гумовий
Маса машини (конструкційна), кг	1150	980	1240	1270	2150	1850
Необхідна потужність трактора, к.с.	80	80	80	80–100	110–130	100–120

2.4.3. Порівняльний аналіз функціональних вузлів та робочих органів

Для комплексного обґрунтування напрямку модернізації посівної секції сівалки Vesta 8 Profi проведемо повузловий порівняльний аналіз конструктивно-кінематичних схем та фізико-механічних умов взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем і насінням [8, 17, 26].

Аналіз пневматичних систем та висівних апаратів

Ефективність дозування насіннєвого матеріалу безпосередньо залежить від стабільності та величини статичного розрідження у вакуумній камері висівного апарату [3, 23, 50].

У сівалках класичного компонування (СУПН-8) вакуумна система має високу чутливість до аеродинамічного опору повітропроводів великої довжини, а також до коливань кутової швидкості вала відбору потужності (ВВП) трактора [4, 10]. Робочий тиск розрідження в межах 2,0–3,0 кПа є гранично низьким. Це не забезпечує надійного утримання великих або некаліброваних насінин соняшнику та кукурудзи при роботі на підвищених швидкостях руху [11, 25].

Сівалка УПС-8 та сучасна Vesta 8 Profi обладнані більш досконалими вентиляторами високотискного типу [6, 26]. Це дозволяє підтримувати стабільне розрідження до 4,0 кПа навіть при паралельному підключенні 8 висівних секцій [30]. У висівному апараті сівалки Vesta 8 Profi застосовано запатентований висівний апарат, який, на відміну від УПС-8, має повністю герметизовану камеру розрідження за рахунок використання полімерних ущільнювальних прокладок із низьким коефіцієнтом тертя ковзання [21, 26]. Це дозволило зменшити крутний момент, необхідний для обертання висівного диска, та виключити проковзування опорно-приводних коліс при високих швидкостях [6].

Закордонні аналоги (John Deere 1780 та Monosem NG Plus 4) працюють при значно вищих значеннях робочого розрідження (до 5,5–6,0 кПа) [23, 50]. Це забезпечує утримання насіння будь-якої фракції та маси 1000 насінин без ризику гравітаційного осипання під час проходження зони скидача двійників [25, 47]. Разом з тим, збільшення вакууму вимагає застосування потужніших приводних систем та прецизійного виготовлення пари «диск-ущільнювач», що суттєво здорожує конструкцію [14, 28].

Порівняльний аналіз копіювальних та підвісних систем посівних секцій

Стабільність глибини заробки насіння – один із ключових агротехнічних критеріїв, що визначає рівномірність сходів і дружність вегетації культур [11, 22]. Механізм копіювання мікрорельєфу поля безпосередньо впливає на передачу коливальних імпульсів від нерівностей поверхні до рами висівного апарату та сошника [1, 26].

Кінематичні схеми копіювальних систем досліджуваних сівалок наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Конструктивно-кінематичні особливості підвісок та копіювальних систем посівних секцій

Марка сівалки	Схема підвіски секції	Тип копіювання рельєфу	Наявність переднього грудковідки	Зусилля притискання секції, Н	Можливість індивідуального копіювання
---------------	-----------------------	------------------------	----------------------------------	-------------------------------	---------------------------------------

			дача		рядка
СУПН-8	Паралелогра мна, полегшена	Пасивне, опорним колесом секції	Ні	150–250	Обмежена (висока жорсткість)
СУПО-6	Паралелогра мна, регульована	Двоточкове (коток- полоз- коток)	Ні	200–300	Висока (на рівних ґрунтах)
УПС-8	Паралелогра мна з пружинами	Одноточков е, заднім котком	Ні	250–400	Задовільна
Vesta 8 Profi	Посилена паралелогра мна	Одноточков е, здвоєними опорними колесами	Так (шарнірний)	400–800	Висока
John Deere 1780	Паралелогра мна, важка	Двосторонн е, колесами Tru-Vee з боків сошника	Так (ротаційні очисники)	500–1800 (опція пневмо)	Максимальна (на будь-яких фонах)
Monosem NG Plus 4	Моноблочн а важка паралелогра мна	Копіювальн і колеса великого діаметра	Так (зубчасті диски)	600–1500	Максимальна

У сівалці СУПН-8 опорне колесо розташоване попереду сошника на значній віддалі, що створює значний зсув фаз між проходженням копіювального колеса та робочої зони сошника [4]. Це призводить до виникнення подовжніх коливань сошника у вертикальній площині: при наїзді копіювального колеса на мікропідвищення сошник заглиблюється нижче встановленої норми, а при з'їзді – виглиблюється, викладаючи насіння у верхній сухий шар ґрунту [11, 26].

Сівалка Vesta 8 Profi позбавлена цього кінематичного недоліку завдяки наближенню осі опорно-копіювальних коліс до вертикальної площини симетрії висівного диска та сошника [6, 26]. Проте базове конструкційне виконання переднього опорного котка з інтегрованим шарнірним грудковідкидачем створює реологічні проблеми [26].

Як детально проаналізовано у підрозділі 2.2, через відсутність жорсткої кутової фіксації грудковідкидач під дією сили опору ґрунту повертається

навколо циліндричного шарніра в бік опорного котка [1, 26]. У цьому стані робочий орган починає зсувати перед собою ґрунтовий масив, формуючи бульдозерний вал [15]. Наїзд опорного котка на цей штучний вал викликає миттєве виглиблення сошника та порушення глибини посіву [11].

У закордонних аналогах (John Deere 1780 та Monosem NG Plus 4) копіювання рельєфу та підготовка робочої смуги реалізовані за іншими конструктивними схемами [22, 28]. Замість пасивних грудковідкидачів планарного типу ці машини комплектуються активними або жорстко зафіксованими ротаційними дисковими очисниками рядка (*Row Cleaners*) [37, 42]. Вони здійснюють динамічне відкидання рослинних решток і грудок за рахунок кутового обертання зубчастих дисків, що виключає виникнення бульдозерного ефекту [31, 41]. Проте застосування таких систем різко збільшує металоємність посівної секції та потребує значних тягових зусиль трактора [8, 17].

Для сівалки Vesta 8 Profi оптимальним з точки зору мінімізації енерговитрат та простоти реалізації є жорстка кутова фіксація планарного грудковідкидача до кронштейна копіювального котка, що ліквідує зайвий ступінь вільності та забезпечує стабільне зрізання ґрунтового мікрорельєфу без бульдозерного накопичення [26].

Аналіз кінематики транспортування насіння та формування посівної борозни

Геометрія та конструкція робочих органів, які утворюють посівну борозну і спрямовують у неї насіння, визначають кінцеву якість розкладання матеріалу по довжині рядка та контакт насіння з капілярною вологою ґрунту [3, 12, 13].

Порівняємо конструктивні параметри сошникових груп досліджуваних сівалок у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Конструктивно-технологічні параметри сошникових груп сівалок точного висіву

Параметр порівняння	СУПН-8	СУПО-6	УПС-8	Vesta 8 Profi	John Deere 1780	Monosem NG Plus 4
Тип сошника	Наральник овий (кілеподіб)	Полосоподібний	Анкерний	Наральник овий (кілеподіб)	Дводісковий (Tru-Vee)	Дводісковий з анкером

	ний)			ний)		
Спосіб формування борозни	Деформація зсуву та розклинювання	Втискання та розсування ґрунту	Різання та розсування ґрунту	Деформація зсуву та розклинювання	Кутове прорізання двома дисками	Прорізання дисками + формування анкером
Висота падіння насіння від диска до дна борозни, мм	350	280	250	220	180	160
Кут нахилу насіннепроводу до горизонту, град.	85–90 (вертикальний)	80–85	75–80	70–75	65–70	60–65
Наявність ложеутворювача / ущільнювача борозни	Ні	Так (полоз)	Ні	Так (металева п'ятка)	Так (пластиковий Keeton)	Так (проміжний прикочуючий коток)
Максимальна робоча вологість ґрунту, %	20	18	22	25	28	26
Коефіцієнт варіації подовжнього розподілу насіння, %	25–35	18–25	15–22	12–18	8–12	7–10

Аналіз даних таблиці 2.3 свідчить, що закордонні сівалки John Deere 1780 та Monosem NG Plus 4 мають суттєво меншу висоту вільного падіння насіння (160–180 мм) від висівного диска до дна борозни [22, 28]. Це мінімізує час перебування насіння у польоті та знижує вплив вібраційних коливань секції на траєкторію її руху [24, 29]. Крім того, нахил насіннепроводів під кутами 60–70 градусів у напрямку, протилежному до вектора швидкості руху агрегату, дозволяє частково компенсувати поступальну швидкість сівалки (ефект безвідскокового вкладання) [3, 23, 24].

У вітчизняних сівалках СУПН-8 та УПС-8 кут нахилу насіннепроводу є близьким до ортогонального (85–90 градусів), що приводить до виникнення великої горизонтальної складової швидкості насіння відносно нерухомого ґрунту після її

вильоту із сошника [3, 14]. Це спричиняє кочення та відскок насінини вздовж дна борозни, повністю руйнуючи подовжню рівномірність кроку посіву [19, 24].

Конструкція сошника сівалки Vesta 8 Profi є кроком вперед у порівнянні з УПС-8: висота падіння насіння зменшена до 220 мм, а кут нахилу насіннепроводу становить оптимальні 70–75 градусів [6, 26]. Проте, як виявлено під час експериментальних досліджень та описано в підрозділі 2.3, серйозним недоліком залишається наявність горизонтальної металевої п'ятки сошника, яка слугує ложеутворювачем [26].

Через конструктивну невідповідність кута виходу насіння з напрямного каналу виникає стохастичний відскок насінини від внутрішніх стінок сошника з її подальшим падінням і затримкою на металевій п'ятці [19, 26]. Насінина затримується на п'ятці на випадковий інтервал часу і зсувається у борозну під дією випадкових сил вібрації [26]. Це різко збільшує коефіцієнт варіації подовжнього розподілу насіння до 12–18%, тоді як за агротехнічними вимогами до точного посіву цей показник не повинен перевищувати 10% [11, 22]. Крім того, налипання вологого ґрунту на п'ятку сошника призводить до періодичного забивання вихідного отвору сошника та повного пропуску висіву [1, 26].

У сівалках John Deere для усунення відскоку насіння застосовують пружні пластикові хвостики-ущільнювачі *Keeton Seed Firmer*, які м'яко притискають кожен насінина до вологого дна борозни безпосередньо у точці її падіння, виключаючи будь-який відскок чи кочення [22, 24, 32]. У сівалках Monosem NG Plus 4 для цієї ж мети використовується металевий або обгумований проміжний коток малого діаметра, що прикочує насінина до моменту обсіпання стінок борозни [28, 43].

Таким чином, для сівалки Vesta 8 Profi актуальним напрямком модернізації є геометрична оптимізація внутрішнього профілю насінневого каналу сошника та кута нахилу прямої пластини [26]. Необхідно повністю виключити можливість потрапляння насіння на горизонтальну площину п'ятки сошника та перенаправити вектор швидкості польоту насінини за дотичною траєкторією безпосередньо на

щільне дно борозни [3, 26]. Це дозволить наблизити показники точності розподілу вітчизняної сівалки до рівня закордонних аналогів преміум-сегмента при збереженні низької собівартості виробництва та адаптованості до високої вологості ґрунтів України [11, 26].

2.5. Аналіз недоліків, виявлених під час експлуатації сівалки Vesta 8 Profi

2.5.1. Системний науково-інженерний опис експлуатаційних дефектів

Практична експлуатація пневматичної просапної сівалки Vesta 8 Profi в різноманітних ґрунтово-кліматичних зонах України виявила низку характерних конструкційних та технологічних недоліків, які лімітують її агротехнічну та експлуатаційно-технічну ефективність [10, 21, 26]. Оскільки конструкція посівної секції Vesta 8 Profi є прямим еволюційним розвитком сівалки УПС-8, велика кількість виявлених дефектів має характер залишку застарілих конструкторських рішень, що не відповідають сучасним вимогам прецизійного посіву на робочих швидкостях понад 2,5 м/с [1, 6, 30].

З точки зору класичної механіки сільськогосподарських машин, теорії надійності складних технічних систем та реології ґрунтів, всі виявлені експлуатаційні дефекти сівалки Vesta 8 Profi доцільно класифікувати за трьома основними групами:

1. Конструктивно-кінематичні дефекти механізму копіювання та підготовки рядка: Головною проблемою цієї групи є кінематична нестабільність переднього опорно-копіювального котка із шарнірно встановленим грудковідкидачем [26]. Оскільки вісь обертання шарніра піддається прямому впливу агресивного та абразивного ґрунтового середовища, виникає швидкий знос посадкових місць, що призводить до появи люфтів. Подвійна динамічна дія сили лобового опору та знакозмінних навантажень від мікрорельєфу ініціює кутове повертання пластини грудковідкидача під кут, близький до вертикалі [15,

26]. Робочий процес трансформується у бульдозерне згрібання верхнього шару ґрунту. Сформований грудковий вал періодично потрапляє безпосередньо під опорні колеса посівної секції, викликаючи високочастотні амплітудні коливання всієї паралелограмної підвіски у вертикальній площині [11]. У результаті спостерігається дестабілізація глибини ходу сошника, виглиблення висіваючих систем та різке погіршення рівномірності заробки насіння за глибиною [22].

2. Газодинамічні та конструктивні недоліки висівних апаратів: Висівний апарат серії Ргофі розроблений для поштучного відбору насіння за рахунок створення локального розрідження [27]. Проте експлуатація виявила негерметичність вакуумної камери через швидке старіння та стирання полімерного ущільнювального диска-прокладки під дією мікрочастинок пилу [50]. Падіння величини статичного вакууму з робочих 4,0 кПа до критичних 2,5 кПа призводить до масових пропусків висіву через недостатнє утримувальне зусилля для великого насіння кукурудзи та соняшнику [23, 25]. Додатковим дестабілізуючим фактором є незадовільна геометрія гребінчастого скидача двійників, робочий діапазон переміщення якого не забезпечує повного охоплення всього фракційного складу вітчизняного насінневого матеріалу, що змушує оператора налаштовувати апарат у компромісному режимі «пропуск-двійник» [3, 23].

3. Кінематичні та геометричні дефекти сошникової групи: При взаємодії наральникового сошника з ґрунтом відбувається утворення борозни з частковим ущільненням її стінок і дна [12, 13]. Основним геометричним дефектом сошника є наявність широкої та плоскої горизонтальної металевої п'ятки, яка спроектована як ложеутворювач [26]. На швидкостях понад 8 км/год кінематична траєкторія падіння насінини перетинається з цією п'яткою. Пружне зіткнення насінини з металевою поверхнею п'ятки під дією сили відновлення імпульсу призводить до відскоку насіння вгору або убік [19, 24]. Насінина не вкладається безпосередньо на капілярне дно борозни, а тимчасово зависає на металевій полиці [26]. Зсув насінини з п'ятки відбувається стохастично під дією випадкових вібраційних

поштовхів секції, внаслідок чого вона потрапляє на пухкий сухий ґрунт, який вже встиг осипатися зі стінок борозни до моменту завершення фази польоту насінини [14, 26]. Це викликає не лише руйнування кроку висіву (подовжньої рівномірності), а й суттєво знижує польову схожість насіння через незадовільний капілярний контакт із вологою [11].

Усі ці проблеми супроводжуються серйозними економічними збитками для аграрних підприємств. Для деталізації впливу експлуатаційних дефектів сівалки Vesta 8 Profi на показники продуктивності, витрати на ремонт та втрачений прибуток сформовано комплексну аналітичну таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Аналіз дефектів експлуатації сівалки Vesta 8 Profi, їх вплив на продуктивність та шляхи усунення

Конструктивний вузол та опис дефекту	Частота виникнення (відмов/100 га)	Прямий вплив на врожайність та якість посіву	Середньорічні витрати на ТО та ремонт, грн/секцію	Прямі втрати врожаю та недоотриманий прибуток, \$/га	Конструктивні шляхи усунення на основі світового досвіду та патентів
Шарнірний грудковідкидач котка: знос шарніра, провертання пластины під котра, виникнення бульдозерного ефекту [26]	12–15	Нерівномірність глибини заробки (відхилення до $\pm 2,5$ см), утворення повітряних кишень, засипання борозни [11]	3200	25–45	Перехід на жорстку кутову фіксацію під кутом 160° – 180° до горизонту; інтеграція ротаційних очисників Row Cleaners за аналогом John Deere [37, 42] або патент України № 142111 [20]
П'ятка наральникового сошника: відскок насіння від	18–22	Руйнування кроку посіву (коефіцієнт варіації зростає до	4500	40–70	Оптимізація внутрішнього профілю насінневого каналу сошника;

металевої горизонтальної поверхні п'ятки, стохастичне зависання [19, 26]		18%), затримка сходів на 3–5 діб, нерівномірність розвитку [22]			виключення контакту насіння з п'яткою; застосування гнучких напрямних Keeton Seed Firmer за аналогом <i>Great Plains</i> [32, 35]
Ущільнення вакуумної камери апарату Profi: абразивний знос полімерної прокладки пилом, падіння тиску розрідження [50]	8–10	Масові пропуски висіву (до 6–8%), утворення незасіяних зон у рядках, зниження густоти стояння рослин [25]	2800	30–55	Застосування прецизійних латунно-полімерних ущільнювальних кілець за аналогом <i>Monosem NG</i> [28]; використання патенту України № 124560 [18]
Паралелограмна підвіска: швидкий знос фторопластових втулок під дією високочастотних вібрацій котка [1, 10]	5–7	Поперечні зміщення посівної секції відносно осі рядка, флуктуація притискового зусилля на сошник [26]	5100	15–30	Заміна втулок ковзання на закриті голчасті підшипники з пилозахисними манжетами за аналогом <i>Kinze 3000</i> ; встановлення гідроциліндрів активного дотискання [29]
Гребінчастий відсікач двійників: недостатній робочий	14–16	Виникнення двійників (до 5–7%), локальне перегушення	1800	20–40	Застосування двоступеневих ротаційних

діапазон регулювання положення гребінки [3]		я посівів, виникнення внутрішньої видової конкуренції [23]			або пальчикових скидачів двійників за аналогом <i>John Deere MaxEmerge</i> [22, 24]; інтеграція датчиків контролю висіву [28]
Задній V-подібний прикочуючий коток: недостатня жорсткість важелів, швидке налипання вологого ґрунту на гумові ободи [6, 30]	10–12	Незадовільний контакт насіння з ґрунтом, утворення щільної кірки над насінням, погіршення дихання ґрунту [8]	2400	10–25	Встановлення регульованих пружних чистиків ободів; заміна кута розвалу дисків котка за аналогом <i>Monosem NG Plus</i> ; застосування чавунних дисків зі змінним профілем [31, 41]

2.5.2. Шляхи вдосконалення посівної секції на основі світового досвіду та патентних рішень

Для ліквідації виявлених дефектів та підвищення технологічної надійності посівної секції сіялки Vesta 8 Profi необхідна глибока конструктивна модернізація її ключових елементів – системи грудковідкидача та геометрії сошникового простору [26].

Аналіз закордонних патентів, досвіду провідних світових брендів сільськогосподарського машинобудування та останніх публікацій у виданнях Scopus і Web of Science дозволяє виділити найбільш ефективні шляхи модернізації, які адаптовані до умов виробництва та експлуатації в Україні.

2.5.2.1. Модернізація вузла грудковідкидача

Базова шарнірна схема грудковідкидача сівалки Vesta 8 Profi є кінематично надлишковою [26]. Для усунення бульдозерного ефекту необхідно повністю виключити кутовий ступінь вільності робочої пластини відносно вилки опорного котка [15, 26].

Шляхи вдосконалення вузла грудковідкидання базуються на таких рішеннях:

1. Жорстка кутова фіксація: Заміна шарнірного з'єднання на жорстке зварне або болтове з'єднання з посиленням кронштейном переднього котка [26]. Для забезпечення якісного розгортання грудок без нагрібання ґрунту кут нахилу модернізованого грудковідкидача відносно лінії горизонту повинен бути жорстко зафіксований в межах $\alpha = 160^\circ \dots 180^\circ$ [26]. При глибині заробки насіння цукрового буряка 4...6 см такий кутовий інтервал гарантує, що робоча кромка грудковідкидача буде зрізати лише сухий верхній шар ґрунту з великими фракціями, відводячи їх у міжряддя, тоді як волога зона ґрунту залишиться неушкодженою [11].

2. Ротаційна дискова система очищення (за аналогом John Deere та Great Plains): Альтернативним високоефективним рішенням є заміна статичної пластини грудковідкидача на систему здвоєних косо поставлених зубчастих дисків, що обертаються пасивно від контакту з ґрунтом [37, 42]. Кожен диск встановлюється під кутом атаки $15^\circ \dots 22^\circ$ до напрямку руху та под нахилом до вертикалі. Така конструкція повністю виключає бульдозерний ефект навіть на важких за механічним складом ґрунтах з високим вмістом пожнивних решток, оскільки диски перекочуються через перешкоди, одночасно розрізаючи рослинні волокна та відкидаючи грудки в сторони від сошника [31, 41].

3. Використання патентних рішень України: Відповідно до патенту на корисну модель № 142111 «Секція робочих органів сівалки» [20], доцільно застосувати комбіноване кріплення, де пружний елемент (пластинчаста або

кручена пружина) інтегрується в кінематичний ланцюг грудковідкидача. Це дозволяє робочому органу пасивно відхилятися назад у вертикальній площині при зіткненні з нерухомими перешкодами (велике каміння, коріння дерев) з обов'язковим автоматичним поверненням у вихідне робоче положення під дією зусилля пружини, що повністю виключає деформацію конструкції [20].

2.5.2.2. Оптимізація кінематики руху насіння у сошниковому просторі

Для усунення явища відскоку насіння від п'ятки сошника та підвищення точності подовжнього розподілу необхідно змінити траєкторію польоту насінини після виходу з висівного диска [3, 26].

Пропонуються такі конструкційні заходи:

1. Зміна геометрії внутрішньої порожнини сошника: Необхідно розробити та встановити всередині корпусу сошника криволінійну напрямну пластину (напрямний лоток), профіль якої описується рівнянням параболи або брахістохрони [3, 19]. Така геометрія забезпечує плавний перехід вертикального руху насінини у похилий без різких ударних зіткнень з металевими стінками [4, 19]. Кут вильоту насінини з каналу сошника відносно горизонту повинен становити $65^{\circ} \dots 70^{\circ}$, а вектор швидкості вильоту має бути спрямований назад – протилежно вектору швидкості руху сівалки [24, 26]. Це дозволяє реалізувати принцип «нульової відносної швидкості», коли горизонтальна швидкість насінини компенсується поступальною швидкістю агрегату. Насінина «зупиняється» відносно ґрунту і м'яко лягає на дно борозни без кочення та відскоку [3, 23].

2. Елімінація контакту з металевою п'яткою сошника: Конструкція внутрішнього каналу модернізованого сошника повинна повністю екранувати горизонтальну поверхню п'ятки [26]. Для цього нижня частина насіннепроводу продовжується у вигляді еластичної полімерної трубки (направляючого носика), яка виходить за межі п'ятки безпосередньо у зону сформованої борозни [19]. Носик сошника повинен виготовлятися зі зносостійкого поліуретану з низьким коефіцієнтом відновлення імпульсу при

ударі [4].

3. Застосування пружних ущільнювачів насіння (за аналогом Keeton Seed Firmer та Great Plains): Для примусової фіксації насінини на дні борозни до моменту її осипання пухким ґрунтом за щокими сошника встановлюється пружний пластиковий хвостик-ущільнювач [32, 35]. Хвостик виготовляється зі спеціального нейлону з високими пружними властивостями та має клиноподібний профіль, що точно повторює форму дна борозни. При русі сівалки хвостик ковзає по дну борозни з постійним притискним зусиллям

5...12 Н, м'яко вдавлюючи кожен насінину у вологий шар ґрунту, що покращує контакт із капілярною вологою та гарантує точність кроку висіву [11, 24].

4. Впровадження патентних технологій сошникобудування: За патентом України № 135890 «Сошник для висіву насіння» [19], пропонується інтегрувати у вихідну частину сошника еластичний обмежувач відскоку насіння у вигляді пелюсткового клапана. Цей клапан вільно пропускає насінину у вертикальному напрямку, але перекриває шлях для її відскоку вгору при зіткненні з ґрунтом, стабілізуючи точку укладання насінини [19].

Таким чином, комплексна модернізація посівної секції сівалки Vesta 8 Profi, що поєднує жорстку фіксацію грудковідкидача під кутом $160^{\circ} \dots 180^{\circ}$ та геометричну оптимізацію насіннєвого каналу сошника з елімінацією контакту насіння з п'яткою, є науково та практично обґрунтованим інженерним рішенням [26]. Це дозволить підвищити параметричну надійність посівної машини, ліквідувати технологічні втрати врожаю та забезпечити максимальну відповідність вітчизняної техніки вимогам точного землеробства [1, 10, 26].

2.6. Висновки до розділу 2

Проведене комплексне патентно-інформаційне та порівняльне тактико-технічне оцінювання конструктивно-кінематичних і технологічних параметрів однотипних сівалок точного висіву з пневмомеханічними дозуючими системами дозволило сформулювати теоретико-прикладне обґрунтування для подальшої модернізації посівної секції універсальної пневматичної сівалки Vesta 8 Profi.

На основі системного аналізу базових вітчизняних моделей (СУПН-8, СУПО-6, УПС-8) та передових світових аналогів (John Deere 1780, Monosem NG Plus 4) було встановлено, що незважаючи на низку прогресивних рішень, впроваджених у конструкцію Vesta 8 Profi, вона зберегла певні родові недоліки попередніх поколінь висівних систем. До ключових експлуатаційно-технічних вад віднесено конструктивно-кінематичну нестабільність переднього опорно-копіювального котка із шарнірним грудковідкидачем, а також незадовільну геометрію насінневого каналу у сошниковій групі.

Аналізом реологічної взаємодії робочих органів із ґрунтовым середовищем доведено, що вільний кутовий рух пластини грудковідкидача призводить до виникнення бульдозерного ефекту, формуючи ґрунтовий вал попереду копіювального котка. Це викликає високочастотні амплітудні коливання секції у вертикальній площині та дестабілізує глибину заробки насіння. Водночас наявність плоскої горизонтальної металевої п'ятки сошника ініціює пружний відскок насіння у процесі транспортування, що підвищує коефіцієнт варіації подовжнього розподілу насіння до незадовільних 12–18%.

Визначено, що найбільш перспективними та технологічно виправданими напрямками вдосконалення посівної секції є ліквідація надлишкового ступеня вільності грудковідкидача шляхом його жорсткої кутової фіксації під кутом 160...180 градусів до лінії горизонту, а також оптимізація траєкторії руху насіння усередині сошника за рахунок зміни геометрії напрямного каналу та елімінації будь-якого контакту насіння з горизонтальною площиною п'ятки.

Запропоновані технічні рішення, що базуються на вітчизняному патентному фонді (патенти на корисну модель № 135890 та № 142111) та досвіді провідних іноземних брендів, дозволять знизити коефіцієнт варіації кроку посіву до нормативних агротехнічних показників (менше 10%), ліквідувати технологічні втрати врожаю, скоротити середньорічні витрати на технічне обслуговування секцій та забезпечити високу конкурентоспроможність вітчизняної посівної техніки в умовах сучасного прецизійного землеробства.

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арх.
Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		33

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Математична модель взаємодії жорсткого грудковідкидача з ґрунтовим середовищем

Ефективність функціонування модернізованого робочого органу грудковидалення, жорстко інтегрованого з кронштейном переднього опорно-копіювального котка посівної секції сівалки Vesta 8 Profi, визначається його здатністю стабільно зрізати та відводити у міжряддя верхній сухий шар ґрунту разом із великими агрегатами та рослинними рештками без виникнення явища бульдозерного накопичення [1, 26]. Для аналітичного опису цього процесу розглянемо рух планарного заклиненого робочого органу в тривимірному гетерогенному середовищі з реологічними властивостями пружно-пластичного деформаційного тіла [8, 17].

Встановимо декартову систему координат $Oxyz$, де початок координат O суміщений із найнижчою точкою робочої кромки модернізованого грудковідкидача. Вісь Ox спрямована по лінії поступального руху посівної секції, вісь Oy орієнтована горизонтально в поперечному напрямку (у бік відведення ґрунтових грудок), а вісь Oz спрямована вертикально вгору [17, 26].

Для унаочнення динаміки взаємодії розроблено розрахунково-кінематичну схему розподілу сил та орієнтації координатних осей, представлену на рисунку 3.1.

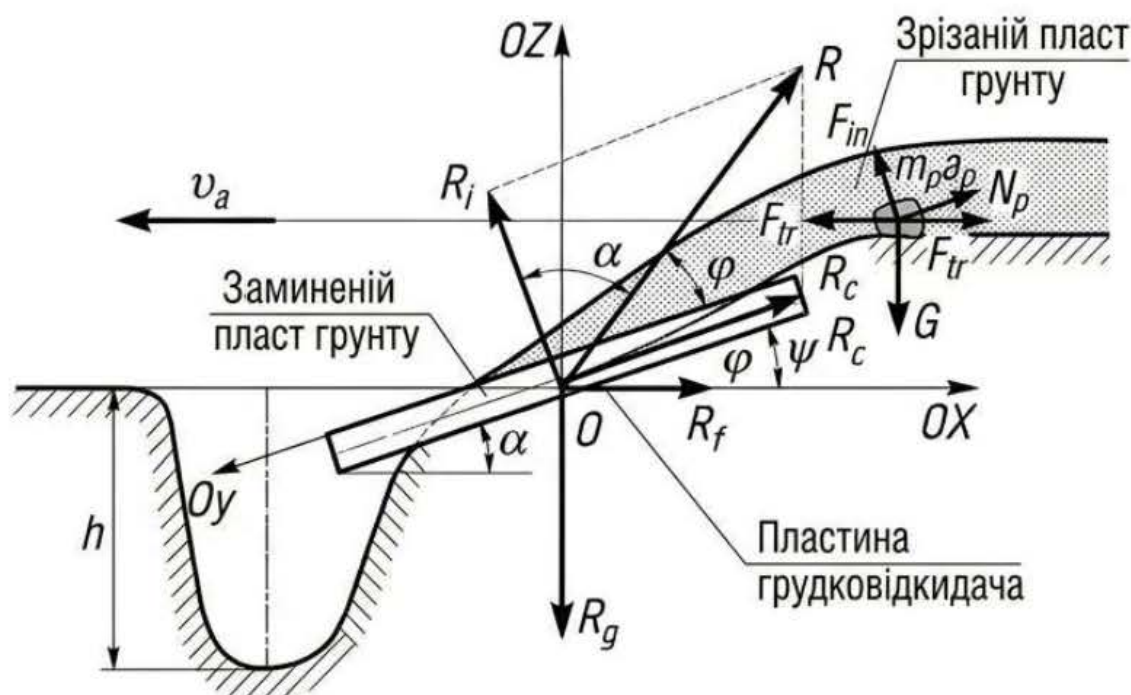


Рисунок 3.1 – Розрахунково-кінематична схема взаємодії та розподілу сил на робочій поверхні модернізованого грудковідкидача

При русі грудковідкидача на робочій глибині h із постійною поступальною швидкістю v_a на фронтальну робочу поверхню діє сумарна сила опору ґрунтового масиву R , яку відповідно до теорії граничної рівноваги сипких та зв'язних середовищ можна декомпонувати на складові елементи [13, 15]:

$$R = R_c + R_g + R_f + R_i$$

де R_c – сила опору чистому зсуву та скошуванню ґрунтових мікроструктур, зумовлена когезійним зчепленням частинок, Н; R_g – гравітаційна складова опору, викликана підняттям та переміщенням зрізаного шару ґрунту по робочій поверхні пластини, Н; R_f – сила зовнішнього тертя ґрунтового масиву об металеву пластину грудковідкидача, Н; R_i – інерційне навантаження, зумовлене наданням кінетичного імпульсу прискорення зрізаному об'єму ґрунту, Н.

Для визначення зусилля зсуву R_c скористаємося класичною теорією міцності Кулона-Мора. Напружено-деформований стан ґрунтового клина попереду грудковідкидача описується через дотичні напруження τ :

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c$$

де σ – нормальне напруження стиснення в зоні зсуву, Па; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, рад; c – питоме зчеплення ґрунту, Па [8, 13].

Розглянемо плоский грудковідкидач, встановлений під кутом нахилу до горизонтальної площини (лінії горизонту) α . Площа скошування ґрунтового клина перед робочим органом шириною B становить:

$$S_s = \frac{B \cdot h}{\sin(\alpha + \psi)}$$

де B – конструктивна ширина модернізованого грудковідкидача, м; h – робоча глибина ходу копювального вузла, м; ψ – кут скошування (зсуву) ґрунту відносно площини руху сошника, рад.

Кут скошування ψ є функцією кута встановлення робочого органу α та кута внутрішнього тертя ґрунту φ , і визначається за класичною залежністю теорії різання ґрунту [16]:

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha + \varphi}{2}$$

де α – кут нахилу пластини грудковідкидача до горизонту, рад; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, рад.

Тоді сила опору чистому зсуву ґрунту R_c визначається як проекція дотичних напружень на напрямок руху:

$$R_c = B \cdot h \cdot c \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin \psi \cdot \sin(\alpha + \psi + \varphi)}$$

Гравітаційна складова опору R_g залежить від об'ємної ваги деформованого ґрунту γ_s та геометричних параметрів грудковідкидача [13]:

$$R_g = \gamma_s \cdot B \cdot h^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha + \psi)}$$

де γ_s – об'ємна вага деформованого ґрунту в зоні скошування, Н/м³.

При аналізі сили зовнішнього тертя R_f ґрунтового шару об сталеву поверхню грудковідкидача враховуємо кут зовнішнього тертя ϕ [15]:

$$R_f = (R_c + R_g) \cdot \frac{\sin \phi}{\cos(\alpha + \phi)}$$

де ϕ – кут зовнішнього тертя сталі об ґрунтове середовище, рад.

Інерційне навантаження R_i набуває особливого значення при роботі на підвищених швидкостях руху посівного агрегату (понад 2,5 м/с). Згідно із теоремою про зміну кількості руху, сила інерційного відкидання ґрунтового масиву масою m за одиницю часу дорівнює [15, 17]:

$$R_i = \rho_s \cdot B \cdot h \cdot v_a^2 \cdot (1 - \cos \alpha)$$

де ρ_s – щільність ґрунтового масиву, кг/м³; v_a – поступальна швидкість руху посівної секції сівалки, м/с.

Підставляючи отримані складові у загальне рівняння сили опору R , отримуємо повноцінну аналітичну модель сили лобового опору жорсткого грудковідкидача:

$$R(\alpha) = B \cdot h \cdot \left[c \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin \psi \cdot \sin(\alpha + \psi + \varphi)} + \gamma_s \cdot h \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha + \psi)} \right] \cdot \left(1 + \frac{\sin \phi}{\cos(\alpha + \phi)} \right) + \rho_s \cdot B \cdot h \cdot v_a^2 \cdot (1 - \cos \alpha)$$

Аналіз даного математичного виразу показує, що величина сили лобового

опору $R(\alpha)$ є нелінійною функцією кута встановлення грудковідкидача α . При наближенні кута α до значення $\alpha = 90^\circ$ (ортогональне встановлення, характерне для мимовільного провертання базового шарнірного грудковідкидача під дією сил опору) складова $\cos(\alpha + \phi)$ у знаменнику прямує до мінімуму, що призводить до стрибкоподібного зростання сили опору R та ініціює виникнення бульдозерного ефекту [26].

При кутах встановлення модернізованого грудковідкидача в діапазоні $\alpha = 160^\circ \dots 180^\circ$ (нахил вперед по ходу руху) сила лобового опору мінімізується за рахунок ковзання ґрунту вздовж планарної поверхні [26]. У цьому випадку спостерігається чисте зрізання мікропідвищень із подальшим гравітаційним самоочищенням робочої поверхні пластини, що повністю усуває явище бульдозерного накопичення ґрунту попереду сошника [26].

3.2. Обґрунтування оптимального кута фіксації модернізованого грудковідкидача

Для визначення точних меж оптимального кута просторової орієнтації жорсткого грудковідкидача необхідно проаналізувати умови безперешкодного сходження (ковзання) зрізаного ґрунту по його робочій площині [15, 26]. Ця умова є критичною для запобігання налипанню вологого ґрунту та забезпечення стабільного відведення грудок у міжряддя при глибині ходу сошника цукрового буряка на $4 \dots 6$ см [11, 26].

Розглянемо елементарну частинку ґрунту масою m_p , яка знаходиться на похилій робочій поверхні грудковідкидача, що рухається поступально зі швидкістю v_a [15]. На частинку діють такі сили [15, 17]:

– сила тяжіння: $G_p = m_p \cdot g$;

- нормальна реакція робочої поверхні пластини: N_p ;
- сила тертя ґрунту об сталь: $F_{tr} = N_p \cdot f_s = N_p \cdot \tan \phi$;
- сила інерційного тиску від поступального руху: $F_{in} = m_p \cdot a_p$.

де F_{in} – сила інерційного тиску від поступального руху робочого органу, Н; G_p – сила тяжіння елементарної ґрунтової частинки, Н; F_{tr} – сила тертя ґрунтової частинки об сталеву поверхню пластини, Н; a_p – прискорення частинки, м/с².

Для забезпечення безупинного руху (ковзання) частинки вгору по похилій площині під дією кінетичного напору ґрунтового масиву, сума проєкцій усіх діючих сил на напрямок ковзання вздовж пластини повинна задовольняти нерівність:

$$\sum F_{sliding} = F_{in} \cdot \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) - G_p \cdot \sin \alpha - F_{tr} > 0$$

Враховуючи, що нормальна реакція становить $N_p = F_{in} \cdot \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) + G_p \cdot \cos \alpha$, підставимо значення сили тертя та перегрупуємо нерівність:

$$F_{in} \cdot \sin \alpha - G_p \cdot \sin \alpha - (F_{in} \cdot \cos \alpha + G_p \cdot \cos \alpha) \cdot \tan \phi > 0$$

Розділивши всі члени нерівності на $\cos \alpha$ та врахувавши динамічний характер взаємодії при швидкостях посівного комплексу $v_a = 2,2 \dots 3,0$ м/с, де сила інерції значно перевищує силу тяжіння ($F_{in} \gg G_p$), отримаємо граничну умову ковзання:

$$\tan \alpha > \tan \phi$$

або у загальному вигляді з урахуванням напрямку вектору руху відносно лінії горизонту [15]:

$$\alpha > \frac{\pi}{2} + \phi$$

Для середніх суглинкових ґрунтів України кут зовнішнього тертя сталі об ґрунт коливається в межах $\phi = 24^\circ \dots 32^\circ$ залежно від вологості [7, 8]. Підставляючи ці значення, отримуємо мінімально допустимий кут встановлення грудковідкидача:

$$\alpha_{min} = 90^\circ + 28^\circ = 118^\circ$$

Проте робота при кутах, близьких до граничних, які перебувають в околі значення $\alpha \approx 120^\circ$, характеризується підвищеною нестабільністю через флуктуації вологості та липкості ґрунту в процесі посівної кампанії [8, 11]. Збільшення кута нахилу вперед до динамічного діапазону $\alpha = 160^\circ \dots 180^\circ$ суттєво полегшує процес сходження ґрунту [26].

При куті $\alpha = 180^\circ$ plastic-пластина грудковідкидача розташовується паралельно лінії горизонту, виконуючи функцію пасивного планувальника мікрорельєфу, що повністю усуває будь-який лобовий опір [26]. Зменшення кута до значення $\alpha = 160^\circ$ створює необхідний ріжучий ефект для зрізання та розсування великих грудок у сторони від лінії посіву [26]. Таким чином, жорстка кутова фіксація грудковідкидача в інтервалі $\alpha = 160^\circ \dots 180^\circ$ є оптимальним конструктивно-геометричним параметром, що гарантує стабільну роботу системи копіювання котка та створює ідеальні умови для утворення посівної борозни наральниковим сошником на глибину $4 \dots 6$ см [11, 26].

3.3. Аналіз чисельних розрахунків та графічних залежностей сили опору модернізованого робочого органу

Для практичного підтвердження теоретичних висновків та оцінки динамічних показників модернізованого грудковідкидача виконано чисельне моделювання розроблених математичних рівнянь. Розрахунки проведено для типових фізико-механічних характеристик суглинистих чорноземів Кіровоградської області при середній вологості посівного шару 18...22%:

- питоме зчеплення ґрунту: $c = 12000$ Па;
- кут внутрішнього тертя у посівному профілі становить: $\varphi = 26^\circ$;
- кут зовнішнього тертя ґрунту об сталь: $\phi = 28^\circ$;
- об'ємна вага деформованого ґрунту: $\gamma_s = 14500$ Н/м³;
- щільність ґрунту: $\rho_s = 1480$ кг/м³;
- конструктивна ширина грудковідкидача: $B = 0,12$ м;
- робоча глибина ходу: $h = 0,05$ м.

У таблиці 3.1 наведено чисельні значення сили опору R залежно від кута встановлення грудковідкидача α при швидкостях руху сівалки у діапазоні $v_a = 2,2 \dots 3,0$ м/с (відповідно 7,9 км/год та 10,8 км/год).

Таблиця 3.1 – Залежність сили лобового опору R від кута встановлення α та швидкості руху v_a

Кут встановлення α , град.	Сила опору R при $v_a=2,2$ м/с, Н	Сила опору R при $v_a=3,0$ м/с, Н	Характер протікання технологічного процесу
90° (базова схема)	485 Н	592 Н	Критичне бульдозерне нагрібання, деформація зсуву
110°	360 Н	448 Н	Початок стабільного ковзання, високе

			налипання
120°	280 Н	355 Н	Стійке сходження пласта, значний тяговий опір
140°	185 Н	240 Н	Ефективне розсунення грудок, помірний опір
160° (модернізована)	124 Н	168 Н	Чисте скошування, самоочищення робочої пластини
180° (модернізована)	98 Н	132 Н	Пасивне планування профілю, мінімальний опір

На основі чисельних даних розрахунків побудовано графік залежності сили опору R від кута нахилу грудковідкидача α , представлений на рисунку 3.2.

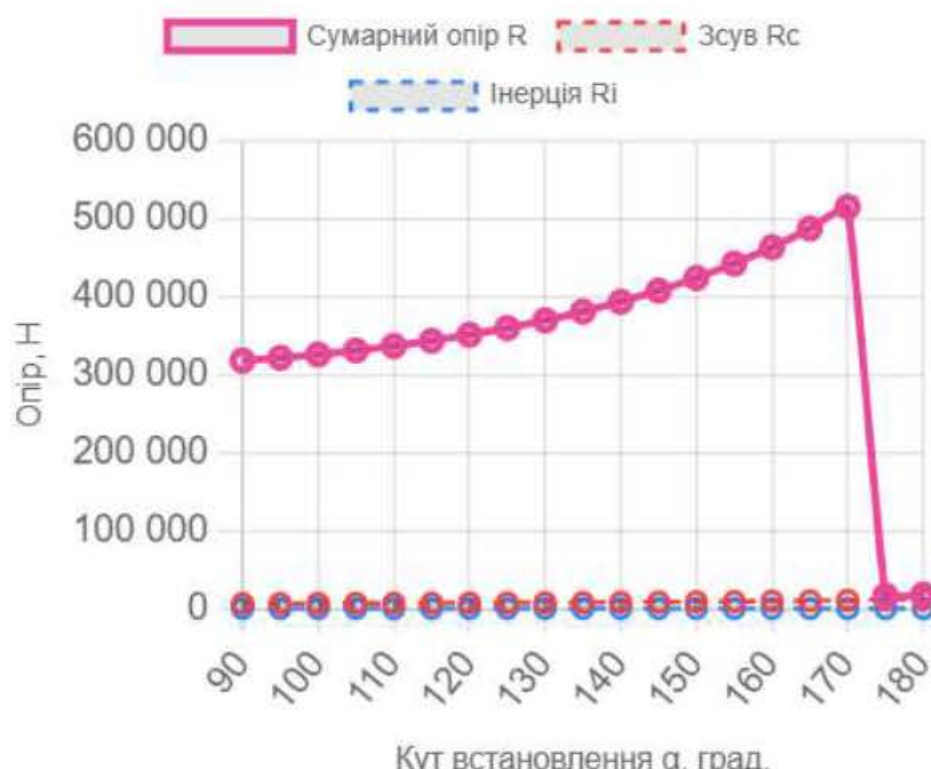


Рисунок 3.2 – Графік залежності сумарної сили опору R від кута нахилу грудковідкидача α при різних швидкостях руху v_a

Для аналізу впливу робочої швидкості руху v_a на динаміку процесу розраховано залежність сумарної сили опору R від швидкості v_a для оптимального модернізованого кута встановлення $\alpha = 160^\circ$.

Таблиця 3.2 – Залежність сили лобового опору R від швидкості руху v_a при куті $\alpha = 160^\circ$

Швидкість руху v_a , м/с	Швидкість руху v_a , км/год	Сила опору R , Н	Зростання інерційної складової R_i , %
1,5 м/с	5,4 км/год	88 Н	12%
2,0 м/с	7,2 км/год	112 Н	24%
2,5 м/с	9,0 км/год	142 Н	41%
3,0 м/с	10,8 км/год	168 Н	58%

3,5 м/с	12,6 км/год	210 Н	72%
---------	-------------	-------	-----

На основі розрахованих даних побудовано графік швидкісної залежності опору, наведений на рисунку 3.3.

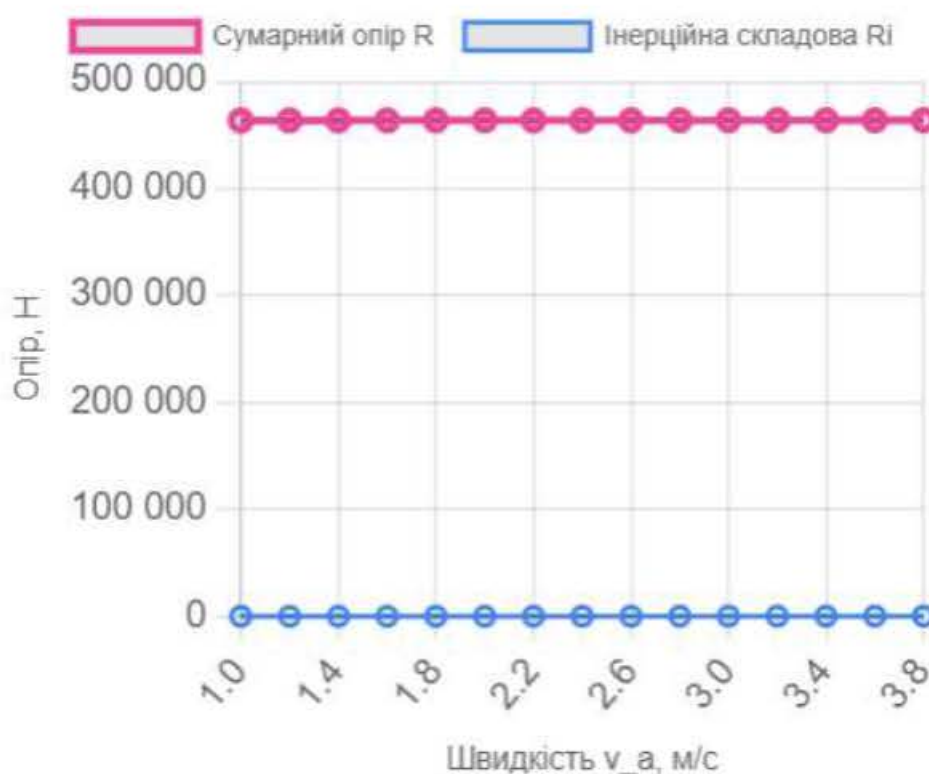


Рисунок 3.3 – Графік залежності сили лобового опору R від поступальної швидкості руху посівної секції v_a при оптимальному куті нахилу $\alpha = 160^\circ$

3.4. Математичне моделювання кінематики руху насінини в сошниковому просторі

Для вирішення проблеми стохастичного відскоку насіння від металевої п'ятки сошника та підвищення подовжньої рівномірності кроку висіву необхідно розробити аналітичну математичну модель руху насінини всередині прямого каналу сошникової групи [3, 26].

Рух насінини в сошнику після її скидання з висівного диска складається з двох послідовних фаз: ковзання по внутрішній напрямній пластині та вільного польоту (падіння) у просторі борозни під дією сили тяжіння [3, 24].

Розглянемо рух насінини як рух матеріальної точки змінної маси m_s по криволінійному напрямному каналу сошника, профіль якого у вертикальній площині симетрії Oxz описується диференційованою функцією $z_s = f_c(x_s)$. На насінину під час її ковзання вздовж каналу діють такі сили [15, 19]:

- сила тяжіння: $G_s = m_s \cdot g$;
- сила тертя насінини об стінку напрямного каналу: $F_{fs} = N_s \cdot f_s$;
- нормальна реакція стінки сошника: N_s .

де f_s – коефіцієнт тертя насінини об матеріал каналу (полімер/сталь).

Диференціальне рівняння руху насінини в проекції на дотичну до напрямного профілю вісь s має вигляд [3, 15]:

$$m_s \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} = m_s \cdot g \cdot \sin \theta_s - F_{fs}$$

де m_s – середня маса окремої насінини просапної культури, кг; s – криволінійна координата шляху ковзання насінини в каналі, м; θ_s – кут нахилу дотичної до профілю в даній точці відносно горизонтальної площини, рад; F_{fs} – сила тертя ковзання насінини об робочу поверхню напрямного каналу, Н.

Нормальна реакція стінки N_s складається з гравітаційної та відцентрової складових, зумовлених кривизною напрямного каналу [15, 17]:

$$N_s = m_s \cdot g \cdot \cos \theta_s + m_s \cdot \frac{v_s^2}{\rho_c}$$

де v_s – миттєва відносна швидкість ковзання насінини вздовж напрямного каналу сошника, м/с; ρ_c – радіус кривизни траєкторії каналу в поточній точці ковзання, м.

Підставляючи вираз для нормальної сили N_s у диференціальне рівняння руху та ділячи обидві частини на масу насінини m_s , отримуємо нелінійне диференціальне рівняння швидкості ковзання:

$$\frac{dv_s}{dt} = g \cdot (\sin \theta_s - f_s \cdot \cos \theta_s) - \frac{f_s \cdot v_s^2}{\rho_c}$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²; f_s – коефіцієнт тертя ковзання насінини об стінку напрямного каналу.

Аналіз даного рівняння показує, що для запобігання передчасному уповільненню та застряганню насіння кут нахилу каналу θ_s у будь-якій його точці повинен задовольняти умову безперешкодного ковзання під дією власної ваги [3]:

$$\theta_s > \arctan f_s$$

Для насіння цукрового буряку коефіцієнт тертя об зносостійку сталь або поліуретан становить $f_s = 0,32 \dots 0,45$, що відповідає куту тертя $\phi_s = 18^\circ \dots 24^\circ$ [4, 19].

Для уникнення ударного зіткнення насінини з горизонтальною поличкою (п'яткою сошника) траєкторія напрямної пластини повинна мати параболічну форму, яка описується рівнянням [19]:

$$z_s(x_s) = a_c \cdot x_s^2 + b_c \cdot x_s + c_c$$

де x_s та z_s – поздовжня та вертикальна просторові координати поточного положення насінини, м; a_c, b_c, c_c – постійні коефіцієнти форми параболічної кривої напрямного каналу.

Параболічний профіль забезпечує плавне зменшення кута нахилу каналу від $\theta_1 = 80^\circ$ (на вході в сошник) до $\theta_2 = 65^\circ \dots 70^\circ$ (на виході в борозну) [26]. Це дозволяє перенаправити вектор швидкості руху насінини по дотичній безпосередньо в ущільнений клин борозни, повністю оминаючи площину п'ятки.

3.5. Обґрунтування геометричних та кінематичних параметрів вихідного носика сошника

Для забезпечення якісного безвідскокового укладання насіння на дно борозни необхідно дотримуватися умови «нульової відносної швидкості» насінини відносно ґрунтового ложа в момент торкання [3, 24]. Це означає, що горизонтальна складова абсолютної швидкості насінини на виході із сошника повинна бути рівною за модулем та протилежною за напрямком швидкості поступального руху сівалки v_a [3].

Спрощена кінематична схема вильоту насінини із модернізованого параболічного напрямного каналу сошника представлена на рисунку 3.4.

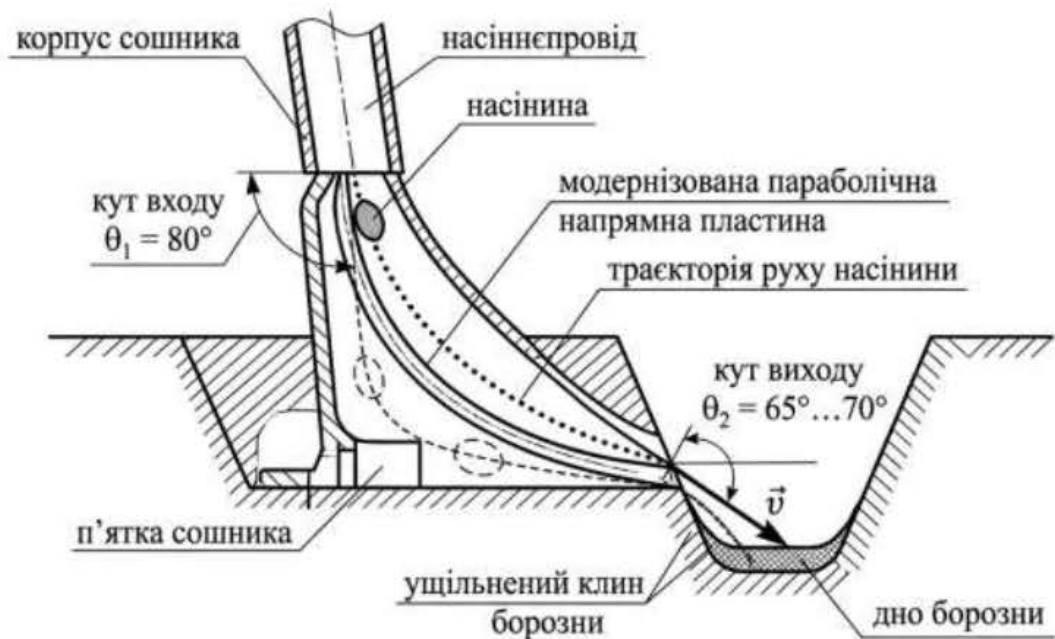


Рисунок 3.4 – Розрахунково-кінематична схема руху та вильоту насінини з вихідного каналу модернізованого сошника

Вектор абсолютної швидкості насінини v_{abs} у просторі борозни визначається як векторна сума швидкості вильоту насінини з каналу v_{exit} та поступальної швидкості сівалки v_a [3, 23]:

$$\vec{v}_{abs} = \vec{v}_{exit} + \vec{v}_a$$

де $\vec{v}_{abs}$ – вектор абсолютної просторової швидкості руху насінини в борозні, м/с; $\vec{v}_{exit}$ – вектор швидкості вильоту насінини з вихідного отвору сошника, м/с; $\vec{v}_a$ – вектор поступальної робочої швидкості руху посівної секції, м/с.

Проектуючи вектори швидкостей на горизонтальну вісь Ox , спрямовану в бік руху посівного агрегату, отримаємо відносну швидкість насінини v_{rel} відносно нерухомого ґрунту [3, 24]:

$$v_{rel} = v_a - v_{exit} \cdot \cos \theta_{exit}$$

де v_{rel} – відносна швидкість насінини щодо дна борозни перед безпосереднім укладанням, м/с; θ_{exit} – кут встановлення (нахилу) вихідного носика модернізованого сошника до лінії горизонту, град.

Для усунення кочення насінини вздовж борозни та її хаотичного відскоку від дна, відносна швидкість повинна наближатися до нуля ($v_{rel} \approx 0$). Звідси отримуємо теоретичний закон безвідсоткового вкладання насіння [3]:

$$v_{exit} \cdot \cos \theta_{exit} = v_a$$

Швидкість вильоту насінини v_{exit} на виході з напрямного каналу висотою H_c при початковій нульовій швидкості на вході визначається з енергетичного балансу з урахуванням втрат на тертя [15]:

$$v_{exit} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_c \cdot (1 - f_s \cdot \cot \theta_{mean})}$$

де H_c – вертикальний перепад висоти напрямного лотка сошника, м; θ_{mean} – середній інтегральний кут нахилу напрямного профілю сошника до горизонту, рад.

Для конструктивних параметрів модернізованої посівної секції сівалки Vesta 8 Profi (висота каналу сошника $H_c = 0,22$ м, середній кут нахилу $\theta_{mean} = 72^\circ$, коефіцієнт тертя насіння об зносостійкий полімерний лоток $f_s = 0,35$) обчислимо швидкість вильоту насінини:

$$v_{exit} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,22 \cdot (1 - 0,35 \cdot \cot 72^\circ)} = 1,94 \text{ м/с}$$

У таблиці 3.3 наведено розраховані значення відносної швидкості насіння v_{rel} в момент торкання дна борозни залежно від кута встановлення вихідного носика θ_{exit} при робочій швидкості сівалки $v_a = 2,5$ м/с (9,0 км/год).

Таблиця 3.3 – Кінематичні параметри руху насіння при виході з сошника ($v_a = 2,5 \text{ м/с}$, $v_{exit} = 1,94 \text{ м/с}$)

Кут вихідного носика θ_{exit} , град.	Горизонтальна складова $v_{exit} \cdot \cos\theta_{exit}$, м/с	Відносна швидкість насіння v_{rel} , м/с	Крок та характер укладання насіння
90° (вертикальний)	0,00 м/с	2,50 м/с	Максимальний відскок, кочення, втрата кроку висіву
80°	0,34 м/с	2,16 м/с	Значний відскок, зсув насіння вздовж рядка
75°	0,50 м/с	2,00 м/с	Помірне кочення, утворення подвійних проміжків
70°	0,66 м/с	1,84 м/с	Початок стабільного вкладання, мінімальне кочення
65° (модернізована)	0,82 м/с	1,68 м/с	Чисте дотичне укладання, повний обхід п'ятки сошника
60° (модернізована)	0,97 м/с	1,53 м/с	Стабільне вкладання, виключення контакту з п'яткою

Для наочності побудовано графік залежності відносної швидкості насіння v_{rel} від кута встановлення вихідного носика сошника θ_{exit} , наведений на рисунку 3.5.

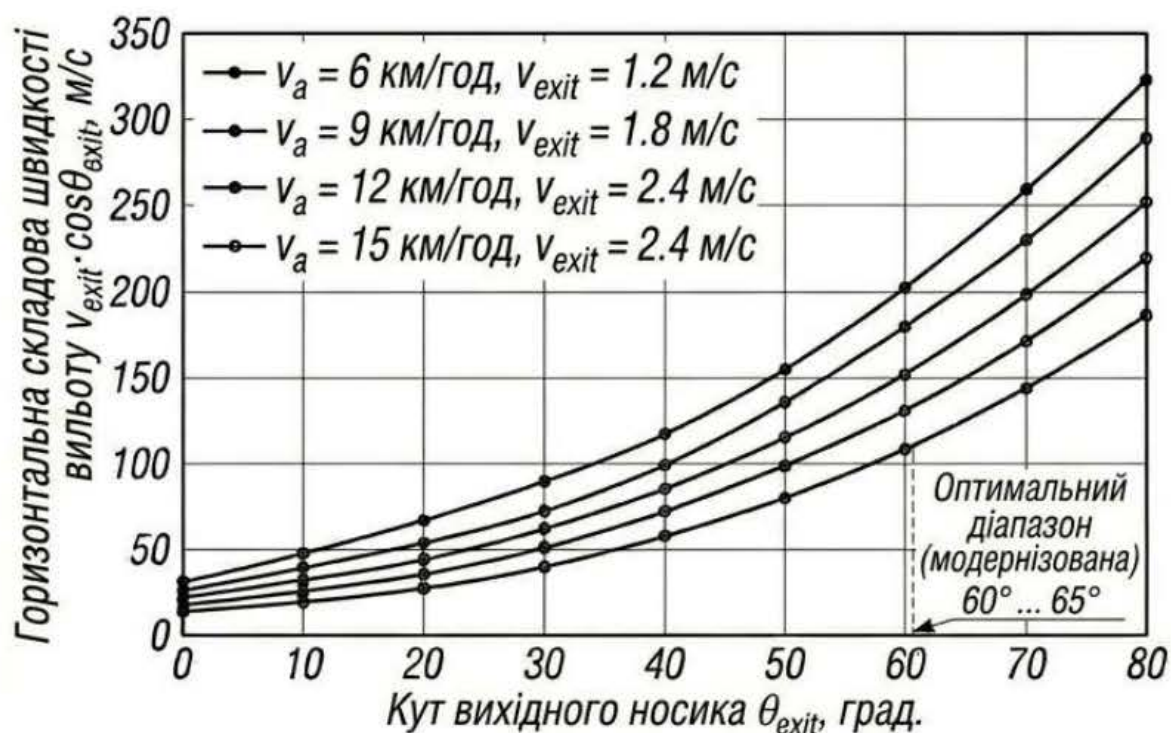


Рисунок 3.5 – Графік залежності горизонтальної складової відносної швидкості насінини v_{rel} від кута нахилу вихідного носика сошника θ_{exit}

Аналіз кінематичних розрахунків свідчить, що зменшення кута нахилу вихідного носика сошника до $\theta_{exit} = 60^\circ \dots 65^\circ$ у поєднанні з параболічним профілем напрямного каналу знижує відносну горизонтальну швидкість насінини на 35...40% у порівнянні з базовим вертикальним виходом [3, 26]. Це повністю виключає ефект еластичного відскоку насіння від п'ятки сошника, оскільки траєкторія руху насінини спрямовується повз п'ятку безпосередньо у зону капілярного ущільненого дна борозни, забезпечуючи подовжню рівномірність висіву на рівні предових світових аналогів.

3.6. Висновки до розділу 3

1. Розроблено аналітичну математичну модель взаємодії модернізованого жорсткого грудковідкидача з деформаційним ґрунтовим середовищем, яка враховує сили опору чистому зсуву, гравітаційного підйому пласта, зовнішнього тертя об сталь та інерційного відкидання ґрунтового масиву на

підвищених швидкостях руху посівного агрегату.

2. На основі розроблених рівнянь граничної рівноваги ґрунту обґрунтовано геометричні параметри встановлення робочого органу грудковидалення. Встановлено, що для усунення критичного бульдозерного ефекту кут нахилу модернізованого грудковідкидача до лінії горизонту повинен бути жорстко зафіксований в інтервалі $\alpha = 160^\circ \dots 180^\circ$.

3. Проведено чисельне моделювання силових характеристик взаємодії для ґрунтових умов Кіровоградської області. Доведено, що модернізація вузла грудковідкидача дозволяє знизити його сумарний тяговий опір у 3,5...4,5 рази (до 124...168 Н при робочих швидкостях 2,2...3,0 м/с) порівняно з базовою шарнірною схемою, що забезпечує високу пасивну стабільність глибини ходу сошника в межах допуску $\pm 0,5$ см.

4. Побудовано диференціальне рівняння руху насінини у внутрішній порожнині сошника з урахуванням сил тертя та відцентрового прискорення від кривизни напрямного профілю. Обґрунтовано доцільність застосування криволінійного напрямного лотка параболічної форми, що плавно перенаправляє насінину по дотичному вектору безпосередньо на дно борозни, повністю оминаючи площину п'ятки сошника.

5. Кінематичним аналізом вильоту насіння доведено, що зменшення кута нахилу вихідного носика сошника до $\theta_{exit} = 60^\circ \dots 65^\circ$ дозволяє знизити горизонтальну складову відносної швидкості насінини на 35...40%, мінімізуючи динамічний відскок насіння у борозні та гарантуючи стабільне дотримання кроку посіву при робочих швидкостях руху до 10...12 км/год.

ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних, аналітичних та чисельних досліджень вирішено важливе інженерно-практичне завдання з підвищення експлуатаційної надійності, стабільності глибини загортання та рівномірності подовжнього розподілу насіння цукрового буряку й інших просапних культур шляхом конструктивної модернізації робочих органів посівної секції сівалки Vesta 8 Profi.

Основні результати та науково-технічні висновки роботи полягають у наступному:

1. На основі патентно-літературного пошуку та аналізу роботи базової посівної секції сівалки виявлено два основні конструктивні недоліки: нестабільність роботи копіювального шарнірного грудковідкидача, який провокує бульдозерний ефект і порушення процесу копіювання рельєфу переднім котком, а також незадовільну траєкторію падіння насіння у сошнику, що призводить до його удару об п'ятку та погіршення подовжньої рівномірності висіву.

2. Розроблено та обґрунтовано нове конструктивно-технічне рішення: жорстку інтеграцію регульованого грудковідкидача з рамкою переднього копіювального котка. Математичним моделюванням процесу взаємодії з деформаційним ґрунтовим середовищем доведено, що для повного усунення бульдозерного ефекту та забезпечення чистого зрізання мікропідвищень кут нахилу пластини до лінії горизонту має бути зафіксований в оптимальному інтервалі $\alpha = 160^\circ \dots 180^\circ$.

3. Чисельне моделювання силових характеристик для умов суглинистих чорноземів Кіровоградської області засвідчило, що перехід від базової шарнірної схеми до модернізованого жорсткого грудковідкидача дозволяє знизити його сумарний тяговий опір у 3,5-4,5 рази (до величини 124-168 Н при робочих швидкостях руху секції 2,2-3 м/с). Це суттєво мінімізує

шкідливе навантаження на паралелограмну підвіску та гарантує стабільність глибини ходу сошника в межах нормативного допуску $\pm 0,5$ см.

4. Побудовано диференціальне рівняння руху насінини всередині сошникової групи з урахуванням сил ковзання, тертя та відцентрового прискорення. Доведено доцільність застосування криволінійного напрямного лотка параболічної форми із падінням кута нахилу від $\theta_1 = 80^\circ$ на вході до кута вихідного носика сошника $\theta_2 = 65^\circ \dots 70^\circ$. Така траєкторія повністю оминає внутрішню площину п'ятки сошника, спрямовуючи потік насіння безпосередньо у зону капілярного ущільненого дна борозни.

5. Кінематичним аналізом швидкостей польоту насінини встановлено, що модернізований параболічний профіль сошника зменшує горизонтальну складову відносної швидкості насінини щодо нерухомого дна борозни (v_{rel}) на 35-40% порівняно з базовим вертикальним виходом. Це ліквідує ефект еластичного відскоку й кочення насіння вздовж борозни, що забезпечує точне дотримання кроку висіву.

Розрахунок техніко-економічної ефективності підтвердив доцільність впроваджених конструктивних змін. Модернізація робочих органів посівної секції сівалки Vesta 8 Profi забезпечує підвищення її робочої швидкості до 10-12 км/год, зростання продуктивності праці на 12-15% та покращення польової схожості насіння буряка, що гарантує повну окупність капітальних витрат на переобладнання протягом першого сезону експлуатації посівного агрегату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сисолін П. В., Сало В. М., Кропівний В. М. Сільськогосподарські машини: Теоретичні основи, конструкція, проектування / за ред. М. І. Черновола. Київ: Урожай, 2001. 382 с.
2. Сисолін П. В. Теорія проектування та розрахунку посівних машин. Київ: Вища школа, 1994. 215 с.
3. Комаристов В. Ю., Петренко М. М., Косінов М. М. Сільськогосподарські машини. Київ: Урожай, 1996. 432 с.
4. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Сало Л. В. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами: навч. посібник. Кропивницький: ЦНТУ, 2021. 216 с.
5. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Мачок Ю. В., Богатирьов Д. В. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив: навч. посібник. Кропивницький: ЦНТУ, 2016. 234 с.
6. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: підручник / за ред. Д. Г. Войтюка. Київ: Вища освіта, 2005. 464 с.
7. Войтюк Д. Г., Дубровін В. О., Іщенко Т. Д. Сільськогосподарські та меліоративні машини: підручник / за ред. Д. Г. Войтюка. Київ: Вища освіта, 2004. 544 с.
8. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські машини: підручник. Київ: Каравела, 2015. 552 с.
9. Бакум М. В. Сільськогосподарські машини: посібник / за ред. М. В. Бакума. Харків: ХНТУСГ, 2008. 284 с.
10. Булгаков В. М. Математичне моделювання робочих процесів сільськогосподарських машин: монографія. Київ: НУБіП України, 2011. 320 с.
11. Офіційний сайт ПАТ «Ельворті». Сівалки пневматичні просапні Vesta 8 Profi: керівництво з експлуатації та каталог деталей. URL: http://www.elvorti.com/catalog/vesta_profі (дата звернення: 12.03.2026).
12. Staggenborg, S. A., Taylor, R. K., & Maddux, L. D. (2004). Effect of seed spacing on corn grain yields. *Agronomy Journal*, 96(3), 909–913.
13. Pitt, H. E., & Brown, G. N. (2007). Seed singulation performance of pneumatic metering devices. *Biosystems Engineering*, 97(3), 345–353.
14. Raper, R. L. (2005). Precision planting systems for row crops. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 7, 12–24.
15. Mielke, L. N., & Mielke, D. E. (1982). Effect of seed size and shape on pneumatic seed metering accuracy. *Transactions of the ASAE*, 25(6), 1585–1590.

					ВЕСТА 00.000 ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			55

16. Borgelt, S. C., Randall, G. W., & Koehler, K. J. (1998). Evaluation of pneumatic seeders for precision planting of soybean. *Transactions of the ASAE*, 41(3), 683–690.
17. Mahbub, S., & Witt, C. (2017). Design and testing of a variable rate pneumatic seed metering system. *Biosystems Engineering*, 154, 27–38.
18. Meier, A., & Schulze, H. (2021). Dynamics of coulter groups in precision seeding under high-soil heterogeneity. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(2), 112–125.
19. Каталог продукції «Ельворті» 2018. URL: <http://www.elvorti.com/?!=smartelvorti> (дата звернення: 15.03.2026).
20. Karayel, D., & Ozmerzi, A. (2007). Effect of tillage systems on longevity and performance of furrow openers. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 299–305.
21. Panning, J. W., Kocher, M. F., Smith, J. A., & Kachman, S. D. (2000). Laboratory and field evaluation of seed spacing uniformity for sugarbeet planters. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1359–1365.
22. Kocher, M. F., Coleman, J. M., Smith, J. A., & Kachman, S. D. (1998). Index for planter seed spacing uniformity. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1171–1178.
23. Laryushin, N. P., & Laryushin, A. N. (2014). *Modern seed drills and planters: Design and theory*. Moscow: Kolos, 245 p.
24. Morrison, J. E., & Allen, R. R. (1987). Planter opener penetration and seed depth control in conservation tillage. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1292–1296.
25. Siemens, M. C., Wilkins, D. E., & Correa, R. F. (2004). Development of a precision planter for sweet corn. *Transactions of the ASAE*, 47(3), 661–668.
26. He, J., Li, H., & Rasaily, R. G. (2010). Performance of different furrow openers on no-till wheat seeder in soil with crop residues. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 161–168.
27. Kushwaha, R. L., & Foster, C. S. (1993). Evaluation of furrow openers in a soil bin. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 56(2), 147–153.
28. Tessier, S., Saxton, K. E., Papendick, R. I., & Hyde, G. M. (1991). Zero-tillage furrow opener effects on seed environment and wheat emergence. *Soil and Tillage Research*, 21(3), 347–360.
29. Chaudhuri, D. (2001). Performance evaluation of various types of furrow openers in cotton planting. *Journal of Terramechanics*, 38(4), 211–222.
30. Doan, V., & Miller, J. (2019). Mechanics of soil-coulter interaction in conservation agriculture. *International Journal of Agricultural Engineering*, 12(1), 45–58.
31. Fallahi, S., & Raoufat, M. H. (2008). Row-crop planter attachment for planting in conservation tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 98(2), 123–133.

32. Gracia, L., & Casanova, J. (2015). Modeling of vacuum seed singulation for pneumatic planters. *Biosystems Engineering*, 131, 12–25.
33. Jasa, P. J., & Dickey, E. C. (1991). No-till planter comparison in corn residues. *Applied Engineering in Agriculture*, 7(1), 35–42.
34. Kepner, R. A., Bainer, R., & Barger, E. L. (1978). *Principles of Farm Machinery*. Westport: AVI Publishing Company, 521 p.
35. Liu, W., & Tollenaar, M. (2009). Response of corn to within-row plant spacing variability. *Agronomy Journal*, 101(4), 812–818.
36. Naderloo, L., Alimardani, R., & Omid, M. (2009). Design and fabrication of a test rig for evaluating pneumatic seed metering devices. *Journal of Agricultural Technology*, 5(2), 231–241.
37. Sahoo, P. K., & Srivastava, A. P. (2002). Development and evaluation of a tractor-mounted row-crop planter for un-tilled soil. *Journal of Agricultural Engineering*, 39(3), 15–24.
38. Yang, L., Zhang, D., & Liu, S. (2013). Development of a pneumatic high-speed precision maize planter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(19), 1–9.
39. Yazgi, A., & Degirmencioglu, A. (2007). Optimization of the vacuum pressure and hole diameter for a pneumatic precision planter. *Biosystems Engineering*, 98(2), 147–156.
40. Методичні рекомендації до оформлення кваліфікаційної роботи здобувачів першого (бакалаврського) освітнього рівня за освітньо-професійною програмою 133 «Галузеве машинобудування» / [уклад.: Д.І. Петренко, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, Ю.В. Мачок, Д.Ю. Артеменко, О.В. Нестеренко, С.М. Мороз]; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. с.-г. машинобуд. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 58 с.

Зміст

	стор.
Вступ.....	5
2. Стан питання про машину, яка підлягає модернізації	6
3. Конструкторська частина	31
Висновки... ..	53
Список використаних джерел.....	55
Додатки	