

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 другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Обґрунтування модернізації універсальної сівалки з дослідженням
пневмосистеми»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи ГМ-24М-1

ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Токарь Олександр Сергійович
« _____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Сергій МОРОЗ

« _____ » _____ 2026 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Кирил ЩЕРБИНА

« _____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Агротехнічний

Кафедра Сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олексій Васильковський

« » 2026 року

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА
ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА
ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Токаря Олександра Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту)

Обґрунтування модернізації універсальної сівалки з дослідженням
пневмосистеми

2. Керівник роботи (проекту)

Мороз Сергій Миколайович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 26.05.2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Підвищення ефективності роботи пневмомеханічного висівного апарата
просапної сівалки

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1–5	Мороз С.М.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Пояснювальна записка	25.05.2026 р.	
2	Графічна частина	25.05.2026 р.	
3	Захист роботи	26.05.2026 р.	

Дата видачі завдання

« 03 » лютого 2026 р.

Підпис керівника

_____ Мороз С.М.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

« 03 » лютого 2026 р.

Підпис здобувача

_____ Токарь О.С.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	5
2. Наукова частина	6
3. Інженерна частина	36
4. Охорона праці.....	47
5. Економічна частина	52
Висновки	53
Список використаної літератури.....	55

ВСТУП

Аграрний сектор України, маючи у розпорядженні понад 33 млн га орних земель (переважно чорноземів), потребує належного рівня інженерного менеджменту для підвищення врожайності культур. Ключовим чинником тут є широке впровадження інтенсивних технологій, що вимагає насичення ринку сучасною технікою. Вітчизняна промисловість, представлена як традиційними спеціалізованими заводами, так і підприємствами, що пройшли конверсію, має достатній потенціал для локалізації та розвитку виробництва таких машин.

Хоча рівень механізації посівних робіт у країні досягає 100%, якісні та кінематичні параметри багатьох експлуатованих сівалок відстають від темпів розвитку агрономічної науки. Постійне вдосконалення технології сівби вимагає відповідної гнучкості від конструкції робочих органів посівних машин. Ефективність сучасних агрегатів оцінюється через призму мінімізації енерговитрат та максимізації їхньої продуктивності. Існуючі технічні рішення часто мають низку конструктивних недоліків, що призводить до пропусків, появи «двійників» чи травмування насіння, а це безпосередньо знижує майбутню врожайність.

Окрему проблему становить сегмент техніки для посіву кукурудзи та схожих за фізико–механічними властивостями культур. Низка недоліків серійних висівних органів обмежує потенціал урожайності через незадовільний розподіл насіння та його пошкодження. Це обумовило вибір теми магістерської роботи, яка присвячена модернізації вертикально–дискового висівного апарата з метою підвищення техніко–експлуатаційних показників посівного агрегата.

2. НАУКОВА ЧАСТИНА

2.1. Літературний аналіз висівних апаратів пневмомеханічних сівалок точного висіву

Сучасний розвиток агроінженерної науки та технологій точного землеробства висуває жорсткі вимоги до робочих органів посівних машин. Головним елементом будь-якої просапної сівалки, що визначає кінцеву якість розподілу насіння в рядку, рівномірність сходів та, як наслідок, біологічний потенціал урожайності культури, є висівний апарат. Завданням цього конструктивного вузла є надійне поштучне відокремлення насінин із загальної маси, транспортування їх до точки скидання та безперешкодне укладання на дно сошника з мінімальним коефіцієнтом варіації інтервалів і нульовим рівнем механічного пошкодження.

У світовому та вітчизняному машинобудуванні найбільшого поширення набули пневматичні висівні апарати, які поділяються на системи вакуумного (всмоктувального) та надлишкового (нагнітального) тиску. Також в експлуатації залишається певна частка механічних дискових систем. Кожна з відомих конструкцій має унікальну архітектуру камери сепарації, механізмів видалення надлишків насіння (скидачів двійників), приводних систем та вивантажувальних каналів. Проведемо детальний порівняльний аналіз двадцяти базових моделей висівних апаратів, що експлуатуються на аграрному ринку України.

Висівний апарат сівалок сімейства VESTA (виробництва ПАТ «Ельворті») [1–2] є класичним представником вакуумних дозувальних систем із вертикально розташованим диском. Конструкція апарата включає литий алюмінієвий корпус, кришку, за нагнітання вакууму в якій відповідає відцентровий вентилятор, та висівний диск. Особливістю апарата є використання диска, який конструктивно закріплений на валу за допомогою швидкознімної гайки–барашка, що полегшує його заміну при переході на іншу культуру. Притискання диска до ущільнювальної прокладки корпусу регулюється осьовим зміщенням. Скидання надлишкового насіння (подвійних насінин) здійснюється за допомогою

гребінчастого скидача, положення якого регулюється важелем за допомогою ексцентрика іззовні корпусу. Головним недоліком цієї схеми є швидке зношування фрикційного ущільнювача через пряме тертя диска об прокладку, що призводить до падіння розрідження та появи пропусків при посіві дрібного насіння, наприклад, проса чи кукурудзи фракційного калібрування.



Рис. 2.1. Секція сівалки VESTA 8 PROFİ

Модернізований вакуумний апарат сівалок VEGA PROFİ представляє наступне покоління дозувальних систем цього ж виробника [3–4]. Тут реалізовано концепцію «сухого» контакту ущільнення. Висівний диск у цій конструкції інтегрований із ворушилкою та приводною ступицею в єдиний блок, який обертається на підшипниках кочення. Ущільнення встановлене не на периферії корпусу, а ближче до центру, що суттєво зменшило момент опору обертанню та мінімізувало втрати вакууму. Гребінчастий відсікач двійників отримав подвійну шкалу налаштування (верхній та нижній повзунки), що дозволяє більш прецизійно налаштовувати апарат під роботу з некаліброваним посівним матеріалом. Крім того, конструкція камери заповнення мінімізує пошкодження насіння завдяки зміненому куту подачі зерна з бункера.

Висівний апарат сівалки Planter–8–01 (СУПН–8–01) є представником історичної серії СУПН–8, однією з найдавніших конструкцій, яка послужила базою для багатьох сучасних машин. Апарат працює за рахунок створення розрідження в підковоподібній порожнині кришки. Його ключова особливість – використання текстолітових або металевих дисків великого діаметра, які



Рис. 2.2. Секція сівалки VEGA 8 PROFI

безпосередньо контактують із чавунним або алюмінієвим корпусом через повстяне ущільнення. Скидання двійників здійснюється примітивною вилкою—відсікачем, яка перекриває зону присмоктування [5]. Недоліками цієї системи є низька герметичність, висока чутливість до частоти обертів вентилятора та швидке стирання диском робочої поверхні корпусу, що робить апарат непридатним для сучасного високошвидкісного посіву.

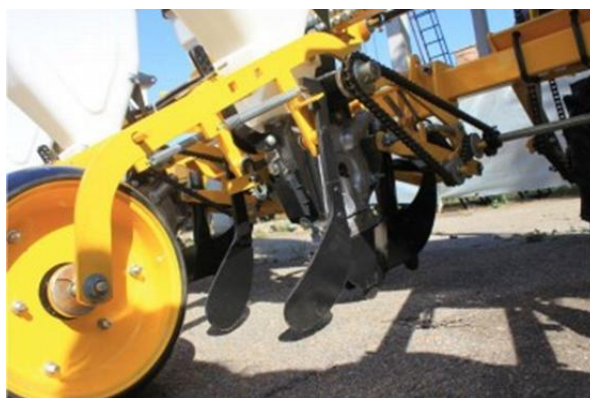


Рис. 2.3. Секція сівалки СУПН 8

Апарат сівалки Весна являє собою модернізовану версію апарата СУПН, виконану із пластиковими елементами корпусу та кришки для зниження загальної маси вузла та уникнення корозії. У цій конструкції застосовано диск із нержавіючої сталі, а герметизація забезпечується гумовим ущільнювальним кільцем спеціального профілю. Механізм видалення подвійних насінин виконаний у вигляді рухомої пластини з гребінчастими зубцями. Хоча апарат демонструє кращу стабільність порівняно з СУПН–8, через обмежену жорсткість

пластикового корпусу при високих температурах навколишнього середовища можливі деформації, що порушують геометрію зони вакууму [6–10].



Рис. 2.4. Секція сівалок серії Весна

Конструкція висівного органа сівалки VENZA базується на передових європейських зразках і використовує концепцію повного розділення камери вакууму та насіннєвої камери через зносостійкі полімерні ущільнювачі з низьким коефіцієнтом тертя. Диск апарата VENZA має більшу кількість отворів, що дозволяє зменшити колову швидкість його обертання при збереженні високої швидкості руху агрегата [11–14]. Система скидання двійників оснащена мікрометричним гвинтом, що дозволяє оператору вносити коригування з точністю до десятих часток міліметра, забезпечуючи відмінну якість пунктирного висіву соняшнику та кукурудзи.



Рис. 2.5. Секція сівалок VENZA

Апарат сівалки СТВТ–12 призначений переважно для точного висіву цукрових буряків, кукурудзи та сої. Особливістю цього апарата є вертикальний диск малого діаметра з комірками–присосками. Малий діаметр диска дозволяє знизити лінійну швидкість отворів, що покращує умови заповнення комірок на швидкостях агрегата до 8–9 км/год. Видалення надлишків насіння реалізовано за допомогою серії послідовних пасивних роликів відбивачів, які механічно зміщують «зайві» насінини назад у насіннєву камеру без ризику їхнього травмування [15].



Рис. 2.6. Секція сівалки СТВТ–12

Вакуумний висівний апарат сівалки HERMES розроблений із фокусом на універсальність та роботу в умовах значної запиленості. Корпус виготовлений методом точного лиття під тиском із композитного матеріалу, стійкого до стирання та ультрафіолету. Диск фіксується магнітною муфтою, що повністю усуває різьбові елементи з камери обслуговування. Скидач двійників має дугоподібну форму з декількома послідовними зубцями, що забезпечує багатоступінчасте очищення отвору диска [16–18].

Висівний апарат MULTICORN 560 використовує унікальний, відмінний від інших вакуумних машин принцип. Тут застосовано диск не з отворами, а зі спеціальними циліндричними кишнями (комірками) на периферії. Вакуум



Рис. 2.7. Секція сівалок HERMES

підводиться з внутрішньої сторони корпусу і утримує насінину всередині комірки. Таке інженерне рішення дозволяє повністю відмовитися від класичних механічних скидачів двійників, оскільки геометричні розміри комірки фізично не дозволяють двом насінинам каліброваного матеріалу розташуватися в ній одночасно. Головна перевага системи MULTICORN – надзвичайно низький рівень пошкодження насіння та стабільність роботи, проте вона вимагає суворого фракційного калібрування посівного матеріалу [19–21].

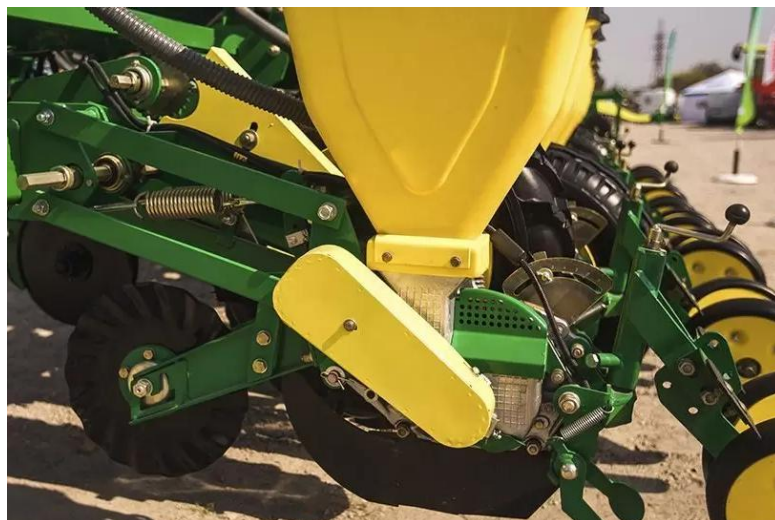


Рис. 2.8. Секція сівалки MULTICORN 560

Італійський апарат SIGMA KING (виробництва SFOGGIA) вирізняється своєю механічною міцністю та надійністю приводних елементів. Корпус

виготовлений із високоякісного латунного або алюмінієвого сплаву, що мінімізує накопичення статичної напруги, яка часто притягує пил та дрібні фракції насіння. Висівний диск обертається разом із опорним валом на закритих підшипниках. Скидач двійників має унікальну конструкцію із двома незалежними гребінками, які взаємодіють з отворами диска як із внутрішнього, так і з зовнішнього радіуса [22]. Це дозволяє досягти високої точності висіву навіть при роботі з важким, нетиповим за формою насінням просапних культур.



Рис. 2.9. Посівна секція сівалки SIGMA KING

Апарати лінійки PLANTER–A та PLANTER–D використовують класичну вакуумну схему, але з різною логікою компонування вивантажувального каналу. В апаратах PLANTER–A диск розташований низько відносно поверхні ґрунту, а скидання насіння відбувається у короткий похилий насіннєпровід, що мінімізує траєкторію вільного падіння зерна та виключає його відбивання від стінок. Модифікація PLANTER–D оптимізована для роботи на вищих швидкостях і має інтегровану систему механічного виштовхування насіння з отворів за допомогою еластичного зірчастого ролика, який примусово очищає кожен отвір у точці припинення дії вакууму, гарантуючи чітке скидання [23–24].



Рис. 2.10. Секція сівалки PLANTER–A6



Рис. 2.11. Секція сівалки PLANTER–A8

Серія висівних апаратів компанії MONOSEM представлена моделями MONOSEM NC, MONOSEM NG та MONOSEM NX. Конструкція апарата серії NC є базовою, де реалізовано вертикальний диск із широким фрикційним ущільнювачем та латунним скидачем. Модель NG зазнала суттєвих змін: корпус отримав розсікач потоку насіння, який оптимізує гідродинаміку насіннєвого масиву у зоні присмоктування, а регулювання скидача двійників було виведено на верхню панель секції зі зручною цифровою шкалою. Найбільш технологічний апарат серії NX розроблений для важких умов роботи та технологій No–Till. Він має посилений корпус із підвищеним захистом від проникнення рослинних решток, а диск оснащений спеціальними лопатями–ворушилками, які активно перемішують важке насіння, запобігаючи утворенню склепін у камері живлення [25–28].

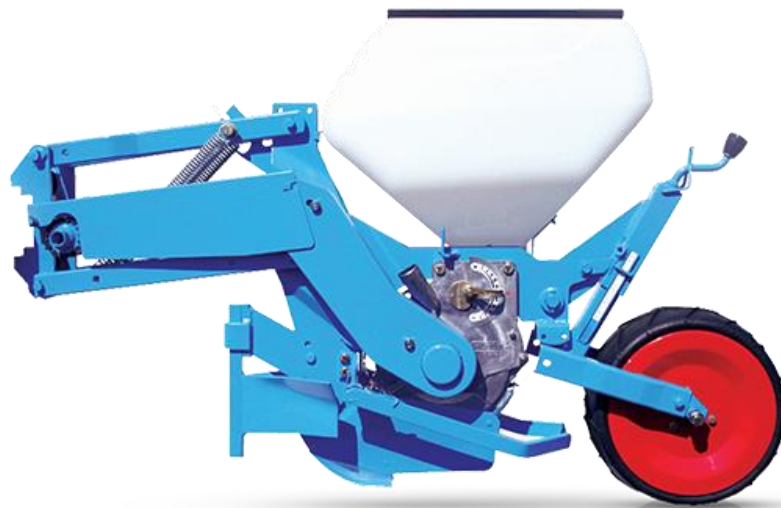


Рис. 2.12. Секція сівалки NC



Рис. 2.13. Секція сівалок NG та NX

Апарат ROMINA MTR від компанії Maschio Gaspardo є зразком високонадійної вакуумної системи, розрахованої на роботу на швидкостях до 10–12 км/год. Конструктивна специфіка апарата MTR полягає у використанні диска великого діаметра (близько 220 мм), що забезпечує плавне переміщення отворів повз зону вакууму і збільшує час експозиції заповнення комірок. Скидач двійників обладнаний пружинним компенсатором, який нівелює вібрації секції під час руху по нерівному полю, зберігаючи незмінним положення зубців відносно отворів диска [29].

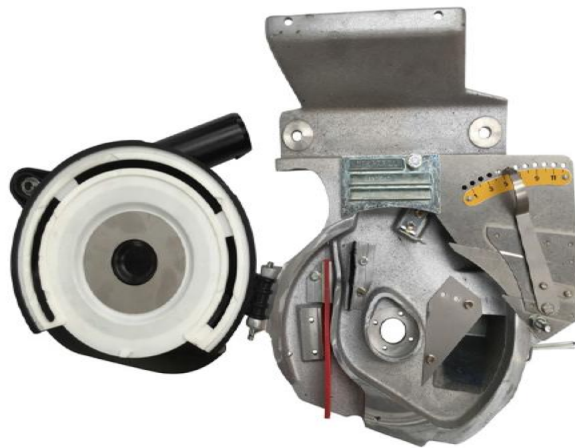


Рис. 2.14. Висівний апарат сівалки ROMINA MTR

Висівний апарат AMAZONE ED функціонує за класичним вакуумним принципом, але з електронною системою контролю оптичного типу, інтегрованою безпосередньо в корпус дозатора. Скидач надлишків насіння виконаний у вигляді диска з пальцеподібними виступами, які здійснюють кругове сканування отворів [30]. Така конструкція забезпечує високу самоочищуваність системи від залишків оболонок насіння та пилу, що критично для збереження точності висіву протягом тривалої зміни.



Рис. 2.15. Секція ED Classic

Німецький апарат Presea від AMAZONE також використовує принцип надлишкового тиску, реалізуючи концепцію високошвидкісного посіву. Корпус апарата Presea має компактну круглу форму. Насінина притискаються тиском

повітря до отворів диска, а видалення двійників здійснюється за допомогою трьох послідовних пальців–відсікачів, які автоматично підлаштовуються під розмір насіння за допомогою електричних сервоприводів на основі даних від оптичних датчиків (система SmartControl). Скидання насіння відбувається у спеціально спрофільований розгінний канал, де повітряний потік супроводжує насінину до самого ложа, виключаючи її хаотичне кочення в борозні [31].



Рис. 2.16. Секція сівалки Precea

Американська система MAXEMERGE 5 від компанії John Deere є еталоном вакуумного дозування в індустрії. Конструкція цього апарата повністю оптимізована під роботу з електроприводом. Корпус має чашоподібну форму, а висівний диск виконаний у вигляді увігнутої пластини з полімерного матеріалу. Насіння подається в нижню частину чаші, де під дією гравітації та форми диска ідеально розподіляється по отворах. Регульований за трьома осями зірчастий скидач подвійних насінин контактує з отворами з високою точністю, а конструкція вивантажувального вікна мінімізує турбулентність повітря, забезпечуючи ідеальну прямолінійну траєкторію падіння насінини в насіннепровід [32].

Кардинально інший інженерний підхід реалізовано у висівному апараті Tempo V шведської компанії Väderstad. Цей апарат працює за принципом надлишкового тиску (технологія Gilstring SeedEye). Повітря під тиском від вентилятора подається всередину герметичного корпусу апарата і притискає



Рис. 2.17. Секція MAXEMERGE 5

насінину до отворів обертового диска. Головна конструктивна відмінність та перевага системи Tempo полягає в механізмі транспортування насіння. У точці скидання дію тиску повітря перекриває спеціальний роликовий відсікач, і насінина під дією того ж самого стисненого повітря буквально «вистрілює» у насіннєпровід через вузький канал (так званий «pressure charging»). Швидкість руху насінина в каналі сягає 50 км/год, що повністю нівелює вплив сили тяжіння, вібрацій секції чи схилів поля. Це дозволяє сівалці Tempo V здійснювати посів із бездоганною точністю на швидкостях до 15–18 км/год, що є недосяжним результатом для будь-якої вакуумної системи [33].



Рис. 2.18. Секція сівалки Tempo V

Важливим критерієм порівняння є тип привода висівних апаратів. У класичних вітчизняних машинах (СУПН-8, VESTA, Весна) та деяких базових імпортованих моделях минулих поколінь використовується механічний привод через систему ланцюгових передач, карданних валів та загальних редукторів від опорно-приводних коліс сівалки. Така схема має високу металомісткість, потребує постійного технічного обслуговування (змащування, натягування ланцюгів) і зазнає негативного впливу від проковзування коліс сівалки на вологих або пухких ґрунтах, що миттєво викликає порушення норми висіву.

Сучасні апарати, такі як VEGA PROFI, VENZA, SIGMA KING, MONOSEM NX та ROMINA MTR, перейшли на використання індивідуальних карданних приводів або гнучких валів (систем типу Flexishaft). Це дозволило позбутися ланцюгів у зоні безпосереднього контакту з ґрунтом, підвищити надійність передачі крутного моменту та забезпечити можливість швидкого відключення окремих секцій за допомогою механічних або електромагнітних муфт.

Найвищий технологічний рівень демонструють апарати Tempo V, Presea, MAXEMERGE 5 та топові версії MONOSEM, які стандартно оснащуються індивідуальними електричними приводами висівних дисків (мотори постійного струму або крокові електродвигуни). Електропривод дозволяє повністю відмовитися від механічних трансмісій. Кожен висівний апарат працює автономно під керуванням бортового комп'ютера по протоколу ISOBUS. Це забезпечує унікальні технологічні можливості: автоматичне відключення секцій на клиноподібних розворотах поля за сигналами GPS (виключення пересівів), миттєву зміну норми висіву з кабіни трактора (диференційоване внесення насіння за картами завдань) та точну компенсацію норми на поворотах, коли зовнішні секції рухаються швидше за внутрішні.

Механізми сепарації (скидачі двійників) також зазнали суттєвої еволюції. Якщо в апаратах СУПН-8 чи VESTA якість налаштування відсікача повністю залежить від людського фактора і потребує ручного регулювання кожної секції на основі візуального огляду, то в сучасних системах Presea та Tempo цей процес автоматизовано. Оптичний датчик у реальному часі фіксує проходження

насінини, і якщо система помічає тенденцію до появи двійників, мікропривод зміщує гребінку відсікача ближче до отворів диска, адаптуючись до зміни калібру насіння в межах однієї партії у бункері.

Конструкція каналу скидання насіння (насіннєпроводу) визначає, чи збережеться точність розподілу, сформована висівним диском, під час польоту насінини до ґрунту. У вакуумних апаратах класичного типу (СУПН, VESTA, СТБТ–12) насінина після припинення дії розрідження падає під дією власної сили тяжіння через пластикову трубку–насіннєпровід. На високих швидкостях (понад 8 км/год) вібрація цієї трубки призводить до того, що насінини б'ються об її стінки, затримуються або прискорюються, що повністю руйнує рівномірність інтервалів у борозні.

У передових апаратах MAXEMERGE 5 цю проблему вирішено шляхом оптимізації геометрії насіннєпроводу (він має плавний вигин назад, що компенсує поступальну швидкість руху сівалки – принцип «нульової відносної швидкості»). В апаратах надлишкового тиску (Tempo V, Precea) падіння як таке відсутнє – насінина примусово транспортується повітряним потоком всередині жорсткого та короткого каналу, що гарантує збереження кроку висіву при швидкостях руху агрегата до 15–18 км/год.

2.2. Обґрунтуванням мети роботи, формування задач, об'єкту та предмету досліджень

Мета дослідження – підвищення якості та експлуатаційної надійності пунктирного висіву насіння просапних культур шляхом наукового обґрунтування та оптимізації конструктивно-технологічних параметрів пневмосистеми вертикально-дискового висівного апарата.

Завдання дослідження:

1. Здійснити комплексний системно-порівняльний аналіз існуючих інженерних рішень та конструктивних схем сучасних пневмомеханічних дозувальних систем вітчизняного та зарубіжного виробництва.

2. Встановити закономірності сукупного впливу конструктивних параметрів та кінематичних режимів роботи вакуумної камери на динаміку і стабільність заповнення насінням комірок (отворів) розподільного робочого органа.

3. Дослідити гідроаеромеханічні процеси взаємодії повітряного потоку з посівним матеріалом у зоні присмоктування насіння та визначити умови бездеструктивного утримання насіння на відбивальних елементах вакуумної камери.

Об'єкт дослідження – технологічний процес дискретного заповнення робочих отворів розподільного елемента пневмомеханічного висівного апарата просапної сівалки посівним матеріалом.

Предмет дослідження – конструктивно-геометричні, аеродинамічні та кінематичні параметри пневмомеханічного висівного вузла, що визначають траєкторію руху, силу присмоктування та рівень механічного пошкодження насіння.

2.3. Програма та методика проведення експериментальних досліджень [34]

2.3.1. Програма експериментальних досліджень

Обґрунтування силових характеристик бездеструктивного утримання насіння різної маси та еквівалентного діаметра залежно від рівня розрідження повітря і геометричних параметрів присмоктувальних отворів розподільного органа. Розрахункове визначення критичної лінійної швидкості посівного диска, яка забезпечує стабільність первинного контакту в умовах високошвидкісних режимів роботи агрегата.

Встановлення характеру розподілу величин статичного та динамічного тиску повітря вздовж дуги кола робочої порожнини вакуумної камери. Оптимізація на основі отриманих даних геометричних параметрів зони дії відсікачів «двійників» та просторової координати зони переривання вакууму, що

забезпечує чітку й стабільну траєкторію польоту насінини в насіннепровід без часового зсуву.

2.3.2. Методика досліджень

Оцінювання якості заповнення робочих отворів розподільного органа здійснювали шляхом фіксації кількості незаповнених комірок (пропусків) у поєднанні з детектуванням фактичного обсягу висіяного насіннєвого матеріалу за фіксований проміжок часу. Для забезпечення високої статистичної надійності та мінімізації випадкових похибок вимірювань, повторюваність усіх дослідних серій на кожному режимі варіювання факторів приймали п'ятикратною.

Висока складність і стохастичний характер гідроаеромеханічних явищ, що супроводжують процес пневматичного дозування насіння, унеможливають побудову адекватної та достовірної математичної моделі процесу суто аналітичними методами. З огляду на це, вирішення поставлених у кваліфікаційній роботі задач реалізовано експериментальним шляхом із застосуванням сучасного математичного апарату планування екстремальних експериментів. Описаний методологічний підхід було покладено в основу оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів вакуумної камери, за яких досягається максимальна ймовірність безвідмовного присмоктування насінин до отворів та їхній подальший рівномірний розподіл у посівній борозні.

2.3.3. Опис приладів, матеріалів, установок

У межах першої серії експериментів було поставлено завдання оцінити ступінь та характер впливу досліджуваних конструктивно-технологічних чинників на якісні показники функціонування пневматичного висівного апарата. На основі отриманої лінійної моделі передбачалося визначити градієнт руху (напрямок крутого сходження) до екстремальної області поверхні відгуку, яка характеризується оптимальними умовами перебігу досліджуваного технологічного процесу.

Для формалізації математичного опису та побудови матриці планування було прийнято такі кодовані й натуральні позначення незалежних чинників та критерію (параметра) оптимізації:

x_1 – частота обертання розподільчого елементу (висівного диску) n ;

x_2 – величина статичного тиску у вакуумній камері h_{cm} ;

x_3 – глибина вакуумної камери H ;

x_4 – кут положення нижнього поріжка вакуум камери ψ ;

x_5 – кут нахилу патрубку підведення вакууму α ;

x_6 – кута положення точки підведення вакууму β ;

x_7 – кут положення верхнього поріжка вакуум камери γ ;

y – показник якості присмоктування насіння до розподільчого елементу.

Технічне забезпечення експериментальних досліджень передбачало використання адаптивного стендового обладнання. Для практичної реалізації пошукових дослідів та визначення екстремальних областей поверхні відгуку було розроблено й задіяно експериментальну вакуумну камеру. Конструкція цього вузла дозволяє в широких діапазонах змінювати та контролювати базові робочі параметри – зокрема, рівень розрідження повітряного потоку, геометричні характеристики зон сепарації й просторове положення відбивальних елементів.

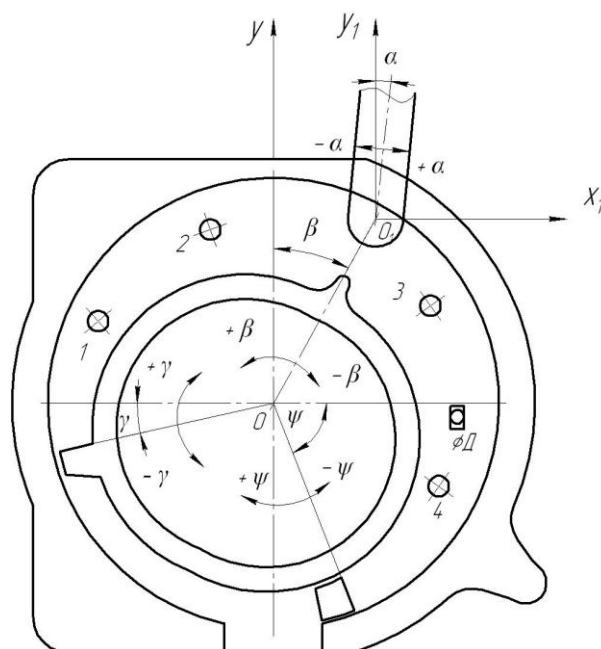


Рис. 2.19. Схема вакуум камери з регульованими параметрами

Для проведення лабораторних випробувань та об'єктивного оцінювання процесу дозування насіння просапних культур в умовах, наближених до реальних експлуатаційних режимів, розроблено оригінальну експериментальну установку (рис. 2.20). Даний лабораторний стенд дозволяє моделювати кінематичні режими роботи розподільного елемента, контролювати стабільність вакуумної системи та здійснювати точну фіксацію кількості заповнених і вільних комірок висівного диска за допомогою засобів інструментального та візуального контролю.

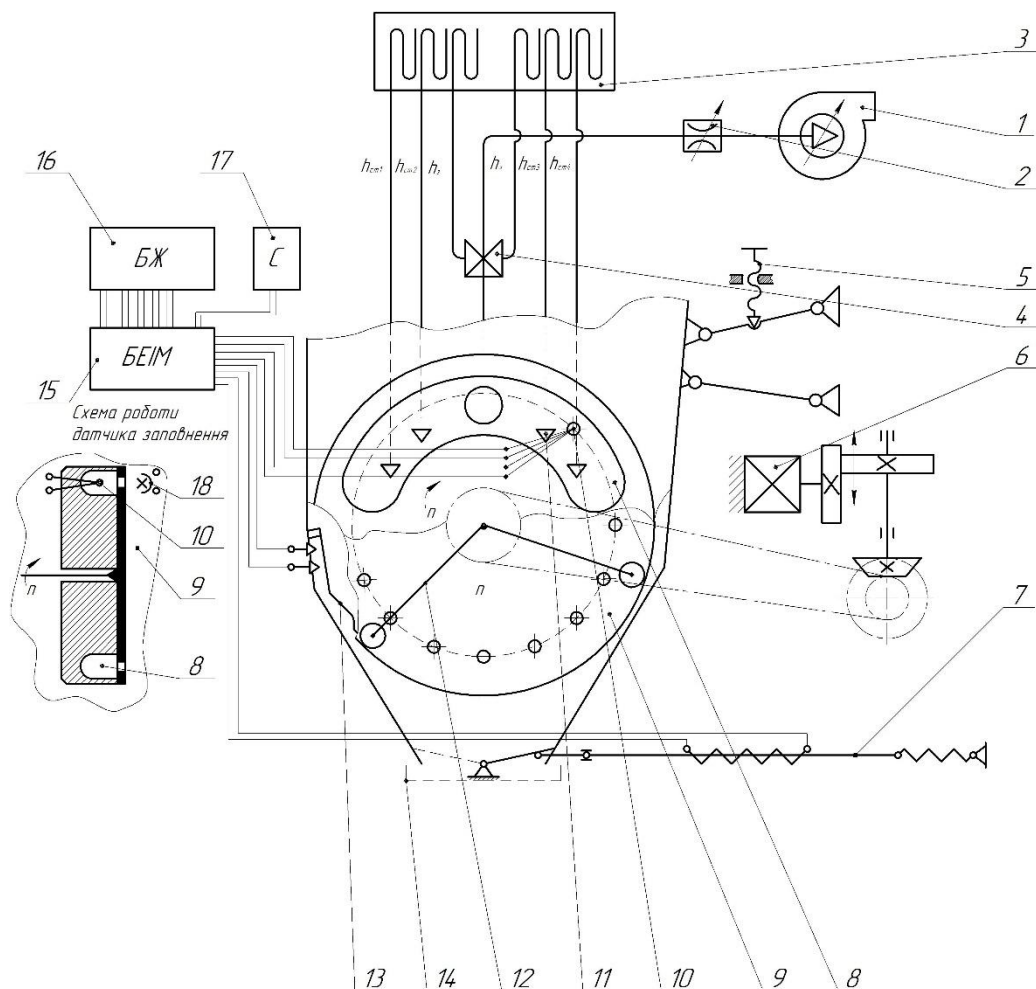


Рис. 2.20. Схема дослідної установки

До складу розробленого лабораторно-експериментального стенда для дослідження пневматичних висівних апаратів входять такі основні вузли, елементи та системи контролю:

1. Вентилятор-ексгаустер із регульованою частотою обертання ротора – призначений для створення та прецизійного керування рівнем розрідження (вакууму) у пневматичній камері висівного апарата.
2. Дросельна заслінка (регулятор тиску) – засіб механічного регулювання величини вакууметрії та статичного тиску в робочій зоні камери.
3. Блок рідинних мікроманометрів – призначений для одночасного високоточного вимірювання та візуалізації значень тиску в чотирьох контрольних точках пневмокамери.
4. Комбіновані первинні перетворювачі (датчики) статичного та повного тиску – встановлені в підвідному патрубку пневмокамери для реєстрації параметрів повітряного потоку.
5. Механізм просторового навішування й позиціонування апарата – забезпечує регулювання положення висівного вузла у вертикальній площині та фіксацію заданого технологічного зазору відносно поверхні нескінченної стендової стрічки.
6. Приводний електродвигун із механічним варіатором – забезпечує безступінчасте регулювання частоти обертання розподільного елемента в заданому діапазоні кінематичних режимів.
7. Електромагнітний механізм дискретного відбору порцій насіння – автоматично перекидає клапаном один із двох насіннєпроводів через кожні п'ять обертів диска у момент замикання контуру відліку.
8. Пневматична вакуум-камера висівного апарата – ізолюваний робочий простір, у якому формується зона зниженого тиску.
9. Розподільний елемент (перфорований висівний диск).
10. Оптико-електронний датчик (фотодіод) – призначений для детектування пропусків (незаповнених комірок диска) та генерації первинного імпульсу для підсилювача сигналів.
11. Додатковий датчик статичного тиску.
12. Двоплечий передавальний важіль механізму керування.

13. Шляховий кінцевий вимикач – забезпечує комутацію електричного ланцюга лічильника обертів та синхронізацію роботи електромагнітного відбірника проб.

14. Коробка-накопичувач для збору відібраних порцій насіннєвого матеріалу.

15. Блок керування електровиконавчими механізмами стенда.

16. Стабілізований блок живлення електронних компонентів.

17. Цифровий лічильник пропусків (незаповнених отворів) розподільного елемента.

18. Джерело фокусованого світла (освітлювальна лампочка) – оптичний елемент, необхідний для стабільної реєстрації світлового потоку фотодіодом.

Динаміку взаємодії елементів стенда під час проведення випробувань доцільно структурувати як послідовний технологічний процес:

- 1). Генерація вакууму та завантаження
- 2). Кінематичне налаштування та розгін
- 3). Скидання насіння та відсікання проб
- 4). Детектування та реєстрація параметрів

Після активації стендового вентилятора-ексгаустера у пневмокамері висівного апарата створюється заданий рівень розрідження повітря. Під дією сформованої різниці тисків насінини із завантажувального бункера притягуються (присмоктуються) до робочих отворів розподільного диска.

За допомогою механічного варіатора оператор виставляє розрахункову частоту обертання висівного диска. При увімкненні приводного електродвигуна розподільний елемент починає обертальний рух, транспортуючи зафіксоване у комірках насіння по коловій траєкторії.

При переході комірок у нижню частину вакуум-камери (зону скидання) дія розрідження припиняється за рахунок внутрішньої перегородки. Насіння під

дією сили важкості відокремлюється від диска й надходить у відкритий канал насіннєспроводу. Завдяки роботі кінцевого вимикача та електромагнітного клапана напрямку руху потоку насіння чергується через кожні п'ять повних обертів диска для точного відбору порцій у коробку проб.

У процесі обертання диска світловий потік від лампи крізь вільні (незаповнені) отвори потрапляє на фотодіод. Електронний сигнал після підсилення реєструється цифровим лічильником пропусків. Одночасно за допомогою датчиків та блока мікроманометрів здійснюється безперервний моніторинг і фіксація значень повного та статичного тиску в підвідному патрубку (рис. 2.21).

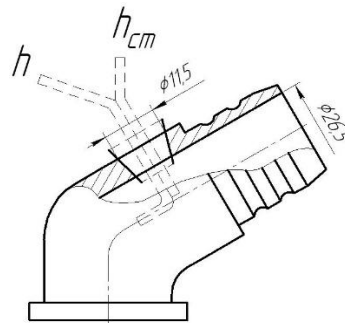


Рис. 2.21. Схема виміру тиску в підводному патрубку.

2.4. Умови проведення дослідів

а якісні показники заповнення робочих отворів розподільного диска насіннєвим матеріалом, окрім аеродинамічних характеристик вакуумної камери, суттєво впливають геометричні параметри — зокрема, діаметр присмоктувального отвору d_1 та діаметр вакуумного отвору d_2 .

Експериментальні дослідження з обґрунтування та вибору оптимальних конструктивних параметрів висівного диска здійснювалися з використанням насіння кукурудзи гібрида ВІР-42 (ІІІ фракція калібрування).

Початкові конструктивно-технологічні параметри пневматичної камери та досліджуваних дисків мали такі значення: статичний тиск у вхідному патрубку

$h_{cm}=230$ мм. в. ст. (2270 Па); $\beta=0$; $\gamma=0$; $\psi=55^\circ$; $z=14$ шт. $d_1=4,0-4,5-5,0-6,0-6,25$ мм; $d_2=6,0-8,0-9,0-11,0$ мм.

Для практичної реалізації сформованого комплексу експериментальних задач та мінімізації обсягу дослідних робіт без втрати інформативності було реалізовано матрицю планування у вигляді дробової репліки типу 2^{7-4} . Статистичне опрацювання масиву отриманих експериментальних даних, розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії та геометричне моделювання багатовимірних поверхонь відгуку здійснювали за допомогою спеціалізованого програмного комплексу для статистичного аналізу STATISTICA [34].

Таблиця 2.1

Реалізація матриця дробної репліки 2^{7-4}
(висів кукурудзи з диском $z=14$; $d=5$ мм)

Фактори	n , хв^{-1}	h_{cm} , мм вод. ст.	H , мм	ψ , °	α , °	β , °	γ , °	λ					$\bar{\lambda}$
Основний рівень	30	150	10	55	65	0	0	Повторність					
Інтервал варіювання	10	50	3	7,5	15	7,5	7,5						
Ходові позначення	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	1	2	3	4	5	
Дослід 1	20	100	7	62,5	80	7,5	-7,5	0,655	0,7	0,715	0,671	0,615	0,673
Дослід 2	40	200	13	62,5	80	7,5	7,5	0,815	0,79	0,845	0,74	0,715	0,781
Дослід 3	40	200	7	62,5	50	-7,5	-7,5	0,715	0,7	0,73	0,87	0,73	0,749
Дослід 4	40	100	13	47,5	80	-7,5	-7,5	0,53	0,7	0,66	0,64	0,558	0,618
Дослід 5	40	100	7	47,5	50	7,5	7,5	0,243	0,272	0,294	0,154	0,362	0,265
Дослід 6	20	200	13	47,5	50	7,5	-7,5	0,87	0,63	0,67	0,817	0,76	0,75
Дослід 7	20	200	7	47,5	80	-7,5	7,5	0,86	0,87	0,76	0,825	0,825	0,747
Дослід 8	20	100	13	62,5	50	-7,5	7,5	0,70	0,6	0,74	0,74	0,77	0,71

Лінійне рівняння регресії, після визначення коефіцієнтів факторів програмою STATISTICA

$$y = 0,6616 - 0,0583x_1 + 0,0951x_2 + 0,1781x_3 - 0,0359x_4 + 0,0431x_5 + 0,0443x_6 - 0,0666x_7.$$

Першочерговим етапом обробки масиву експериментальних даних є перевірка відтворюваності процесів та однорідності отриманих результатів у кожній строчці реалізованого плану. Статистичний аналіз накопиченого матеріалу дозволяє зробити такі узагальнення.

Гіпотеза про рівноточність вимірювань у дослідних серіях повністю підтверджується. Розрахункове значення критерію Кохрена, яке характеризує відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій дослідів, становить $G=0,229$. Оскільки отриманий показник є меншим за табличний критерій (0,3910), що визначений для п'ятикратної повторюваності ($n=5$) та відповідного числа ступенів вільної класифікації, випадкові похибки експерименту вважаються несуттєвими, а дисперсії – однорідними [34].

Помилка експерименту рівна

$$\sigma_{\bar{\lambda}} = 0,033.$$

Оцінювання статистичної значущості отриманих коефіцієнтів рівняння регресії здійснювали за t -критерієм Стьюдента для довірчої ймовірності $P=0,95$ та числа ступенів вільності $f=7$. Критичне (табличне) значення критерію Стьюдента для цих умов становить $t_{табл}=2,37$.

Дисперсія вихідних коефіцієнтів регресії S_{bi}^2 , зумовлена похибкою відтворюваності експерименту, була розрахована за формулою

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{N},$$

де $N=8$ – кількість спроб у матриці планування дробової репліки 2^{7-4} .

Довірчий інтервал Δb_i для оцінювання значень коефіцієнтів рівняння визначали як:

$$\Delta b_i = \pm t_{табл} \cdot S_{bi}.$$

Проведений аналіз показав, що всі одержані коефіцієнти є статистично значущими, оскільки їхні абсолютні значення перевищують довірчу оцінку.

Проте коефіцієнти b_4 , b_5 та b_6 є близькими до межі статистичної незначущості (їхні значення наближаються до величини довірчого інтервалу).

Перевірку адекватності отриманого математичного опису здійснювали за допомогою критерію Фішера (F -критерію). Розрахункове значення критерію становить $F_{розр}=2,62$, що є меншим за критичне табличне значення $F_{табл}=5,59$. Отже, гіпотеза про адекватність лінійного рівняння регресії повністю підтверджується, що дозволяє використовувати отриману модель для подальшої реалізації градієнтного методу (крутого сходження) з метою пошуку екстремуму.

Аналіз отриманого рівняння регресії дозволяє встановити характер та ступінь впливу досліджуваних чинників на перебіг технологічного процесу:

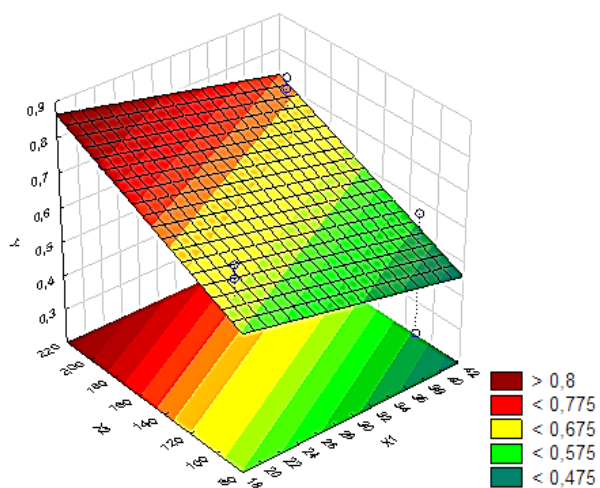
Найбільш істотний вплив на якісні показники роботи пневматичного висівного апарата чинить фактор x_3 (глибина вакуумної камери H), коефіцієнт регресії якого становить $b_3=0,1781$. Позитивний знак коефіцієнта вказує на те, що зі збільшенням глибини камери H значення параметра оптимізації (коефіцієнта якісного заповнення отворів λ) підвищується.

Менш інтенсивний, проте статистично значущий вплив мають чинники x_2 (величина статичного розрідження у камері h_{cm}), x_7 (положення верхнього поріжка камери, зумовлене кутом γ) та x_1 (частота обертання диска n). Їхні коефіцієнти регресії становлять відповідно: $b_2=0,0951$; $b_7=-0,0666$; $b_1=0,0583$.

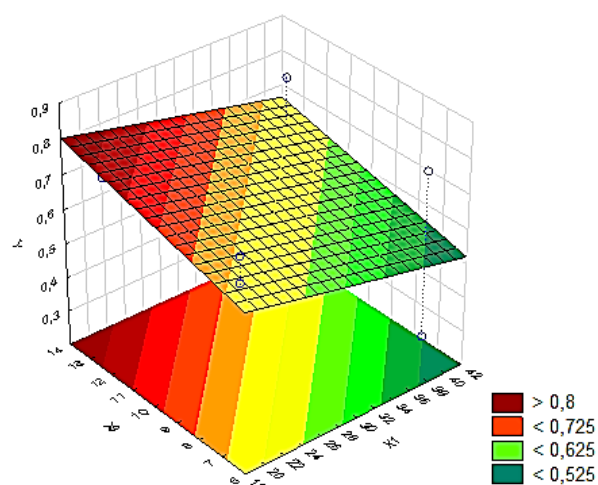
Таким чином, комплексний аналізований показник λ зростає при збільшенні глибини камери H та рівня розрідження h_{cm} , а також при зменшенні кутової координати поріжка γ та зниженні частоти обертання розподільного диска n .

Висновки за розділом

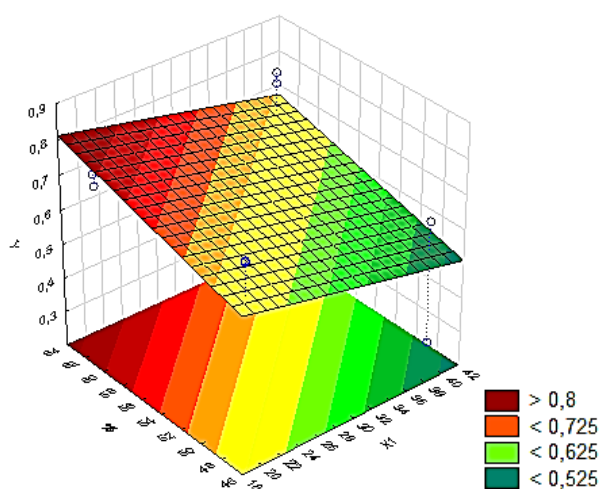
На основі реалізованої регулярної дробової репліки плану 2^{7-4} та її статистичної обробки у середовищі програми STATISTICA [34] отримано адекватну лінійну математичну модель процесу пневматичного дозування насіння просапних культур.



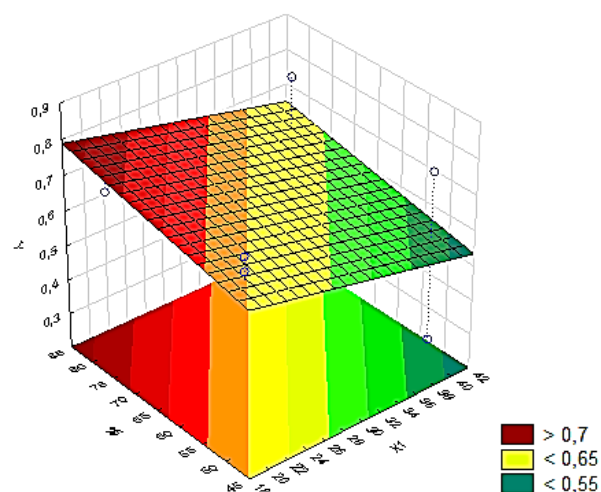
а



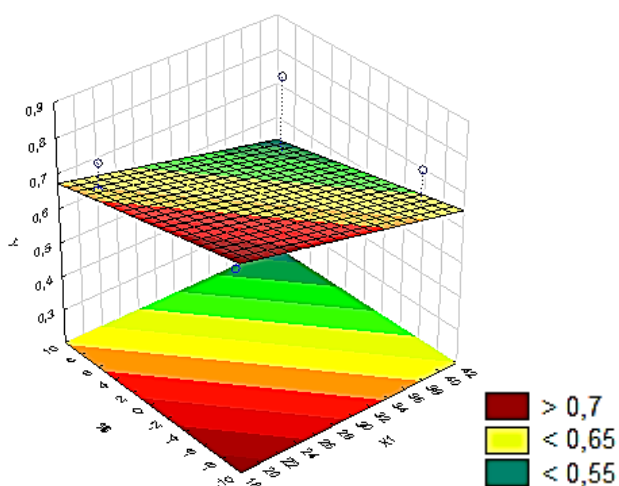
б



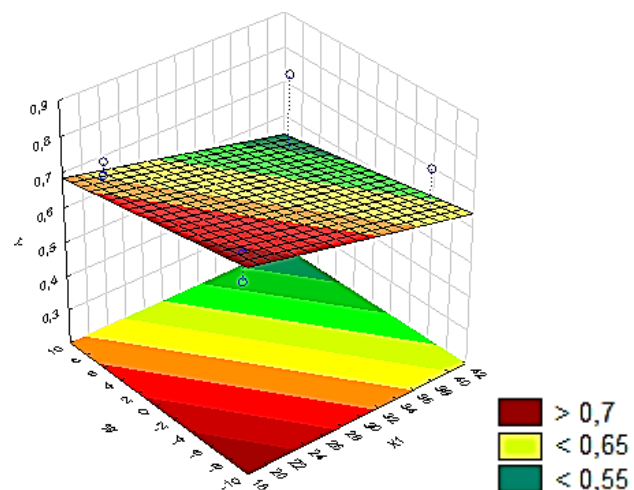
в



г



д



е

Рис. 2.22. Поверхні відгуку $Y=f(x_1x_2)-Y=f(x_1x_7)$ впливу на критерій оптимізації Y частоти обертання розподільчого елемента n та параметрів:

а – h_{cm} ; б – H ; в – ψ ; г – α ; д – β ; е – γ

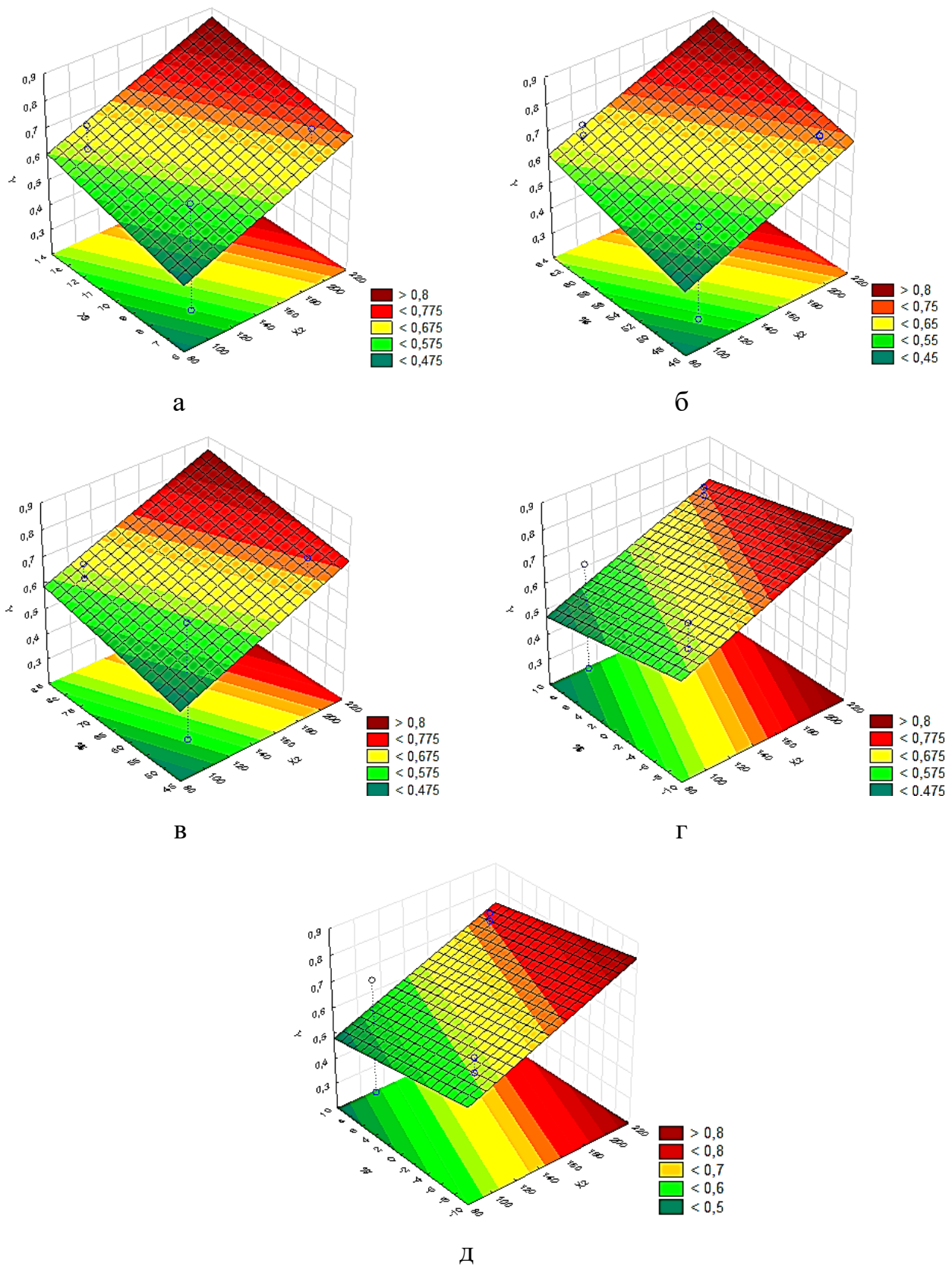


Рис. 2.23. Поверхні відгуку $Y=f(x_2x_3)$ – $Y=f(x_2x_7)$ впливу на критерій оптимізації Y величини статичного тиску у вакуумній камері h_{cm} :

а – H ; б – ψ ; в – α ; Г – β ; Д – γ

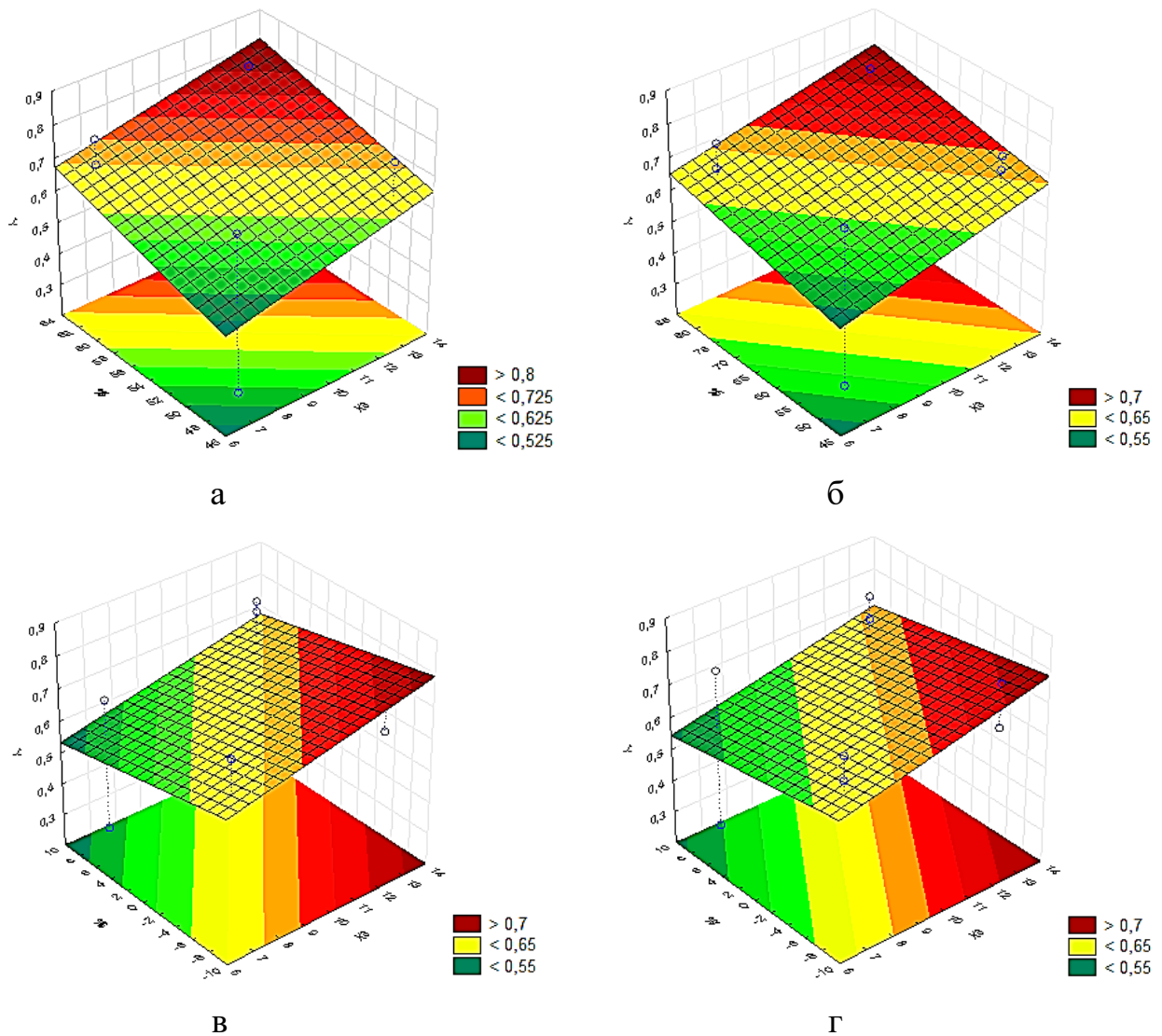


Рис. 2.24. Поверхні відгуку $Y=f(x_3x_4)$ – $Y=f(x_3x_7)$ впливу на критерій оптимізації Y глибини камери H та параметрів:

а – ψ ; б – α ; в – β ; г – γ

Встановлено, що на якість заповнення робочих отворів розподільного елемента (диска) найбільшою мірою впливають такі конструктивно-технологічні параметри (розміщені у порядку спадання абсолютних значень коефіцієнтів регресії):

- глибина вакуумної камери H ($b_3=0,1781$);
- величина статичного розрідження (вакууму) у камері h_{cm} ($b_2=0,0951$);
- просторове положення верхнього порізка вакуумної камери, визначене кутом γ ($b_7=-0,0666$);
- частота обертання розподільного диска n ($b_1=0,0583$).

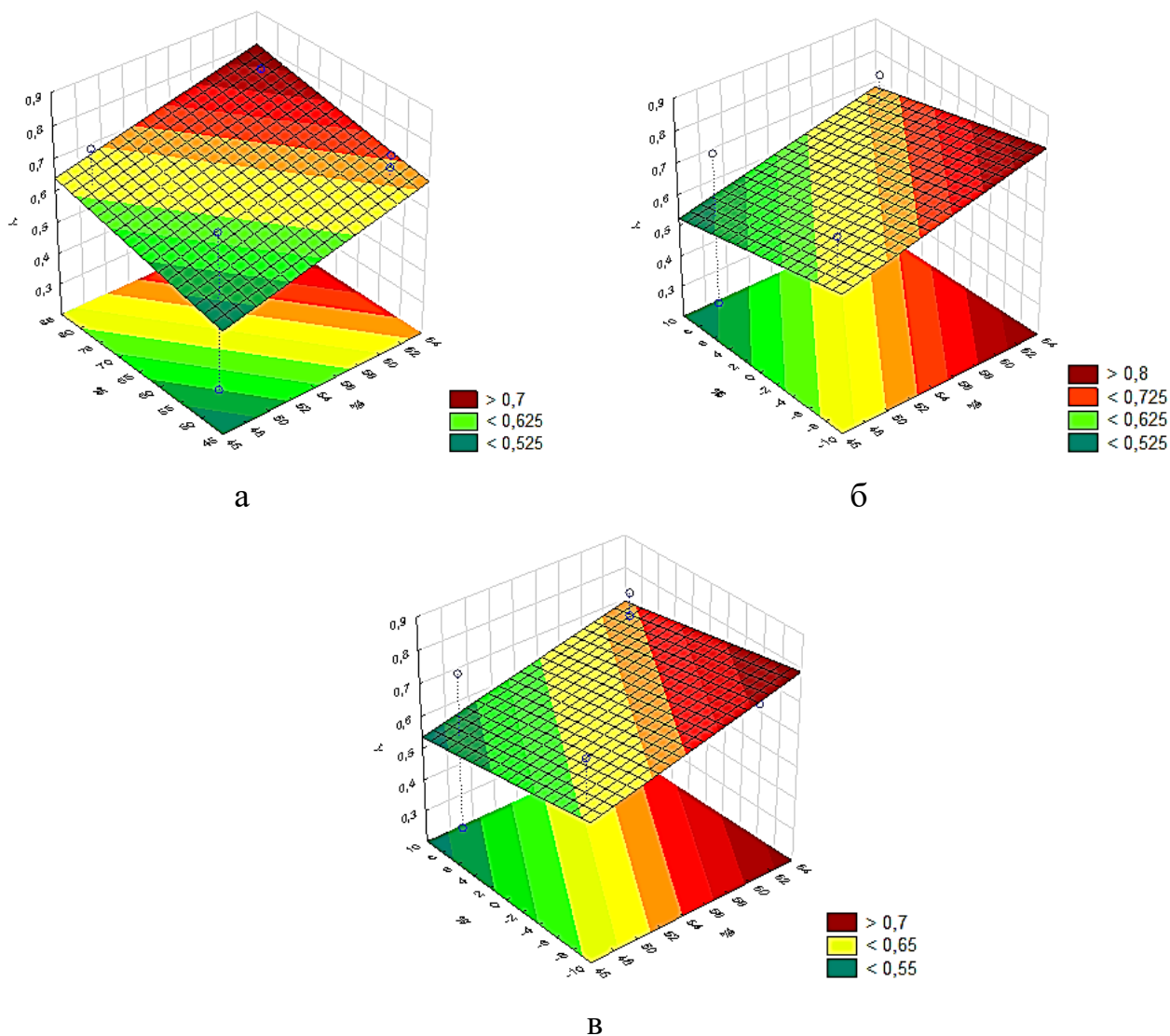


Рис. 2.25. Поверхні відгуку $Y=f(x_4x_5)-Y=f(x_4x_7)$ впливу на критерій оптимізації Y кута положення нижнього поріжка вакуумної камери ψ та параметрів:

а – α ; б – β ; в – γ

Одержана лінійна модель є адекватною за критерієм Фішера, оскільки $F_{розр}=2,62 < F_{табл}=5,59$.

Неістотно впливають на процес присмоктування насіння параметри:

- положення нижнього поріжка (кут ψ);
- нахил патрубку підведення вакууму (кут α);
- положення точки підведення вакууму (кут β).

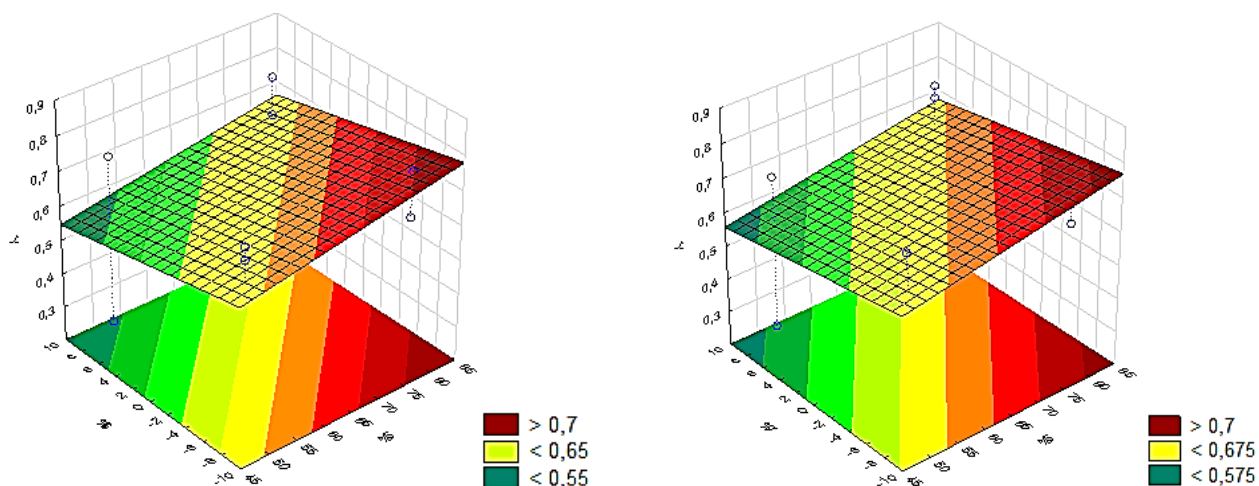


Рис. 2.26. Поверхні відгуку $Y=f(x_5x_6)-Y=f(x_5x_7)$ впливу на критерій оптимізації Y глибини камери H та параметрів:

а – β ; б – γ

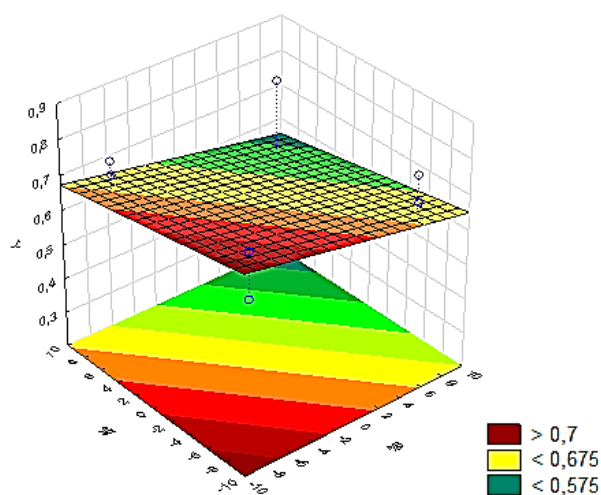


Рис. 2.27. Поверхня відгуку $Y=f(x_6x_7)$ впливу кута положення точки підведення вакууму β та кута положення верхнього поріжка вакуумної камери γ на критерій оптимізації Y

Оптимальними параметрами вакуум камери для насіння кукурудзи можна вважати:

- а) $h_{cm}=2258\div 2650$ Па ($h_{cm}=230\div 270$ мм . вод. ст.);
- б) $\gamma=-7\div 8^\circ$;
- в) $H=13\div 15$ мм;
- г) кутова швидкість до $\omega=7,35$ с⁻¹ ($n=70$ хв⁻¹ при $z=14$), що еквівалентно робочій швидкості сівалки до 13,5 км/год.

При дослідженні було встановлено, що:

- заповнення отворів розподільчого елементу погіршується при виборі кута γ позитивним (тобто при зменшенні довжини вакуум камери);
- при зменшенні глибини камери H негативне значення кута γ повинно збільшуватися;
- зменшення вакууму, нижче обумовлених меж, приводить до збільшення числа незаповнених отворів, збільшення вакууму призводить до зростання кількості насіння, що присмоктується по два до одного отвору.

3. ІНЖЕНЕРНА ЧАСТИНА

3.1. Технологічні розрахунки [35–37]

3.1.1. Розрахунок пневматичного висівного апарату

технологічний процес роботи пневматичного висівного апарату точного однонасінного висіву ґрунтується на здатності посівного матеріалу фіксуватися на робочих отворах розподільного диска під дією аеродинамічної сили всмоктувального повітряного потоку.

Під час обертання розподільного диска та його проходження крізь насіннєву масу на окремі насінини діє динамічний тиск повітря, що протікає крізь отвори внаслідок створеного у вакуумній камері розрідження. Захоплення та стабільне утримання насінини коміркою диска можливе за умови, що виникає аеродинамічна сила, яка за своєю величиною перевищує сумарну дію сил інерції, ваги насінини та її зчеплення з суміжними елементами зернового шару.

Для забезпечення гарантованого заповнення комірок посівним матеріалом необхідно не лише підтримувати оптимальний рівень статичного розрідження у вакуумній камері, а й застосовувати додаткові конструктивні елементи. До них належать механічні або пневматичні зворушувачі насіннєвого шару (для руйнування склепінь та зниження сил зчеплення) і відбивачі (скидачі) надлишку насіння, які забезпечують суворе поштучне виділення та усувають появу «двійників».

Ефективність функціонування пневматичної висівної системи суттєво залежить від комплексу фізико-механічних та аеродинамічних властивостей посівного матеріалу. Основними з них є:

- парусність та критична швидкість витання насіння;
- ефективний радіус дії всмоктувального повітряного факела (відстань стійкого захоплення);
- початкова відносна швидкість руху насінини щодо завантажувального отвору;

- коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя;
- щільність (об'ємна маса) та геометричні характеристики насіння.

З метою теоретичного обґрунтування параметрів робочого процесу визначимо величину необхідного розрідження, яка гарантує надійне присмоктування насіння та його утримання на диску під час транспортування у зону скидання.

Слід враховувати, що із підвищенням частоти обертання розподільного диска суттєво зростають відцентрові сили. За певних кінематичних режимів ці сили здатні подолати утримувальне аеродинамічне зусилля, що призводить до відриву насінини від робочого отвору та її зміщення вздовж координатної осі y (у радіальному напрямку).

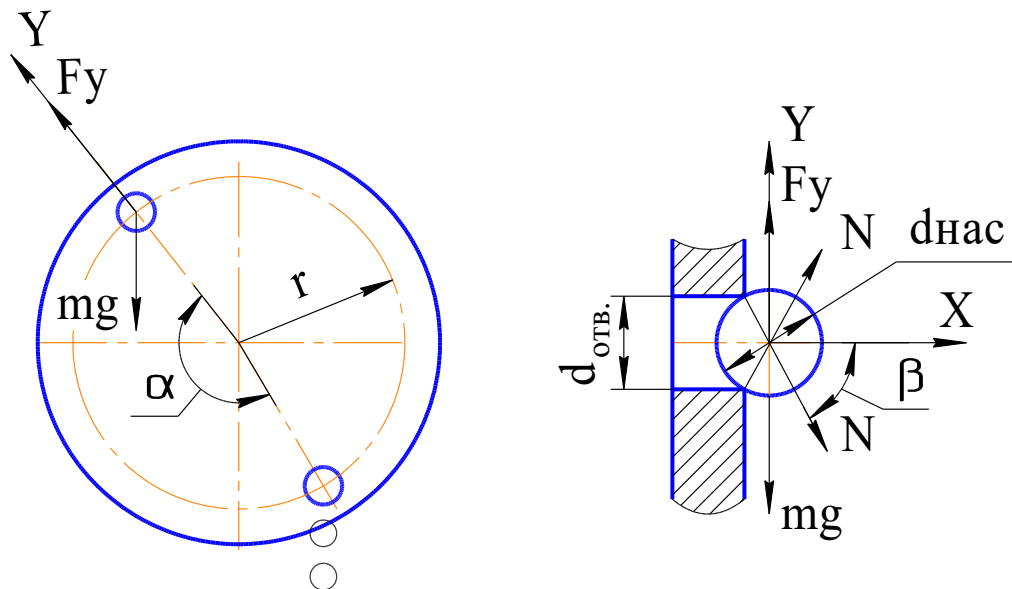


Рис. 3.1. Схема сил, діючих на зернятку, присмоктане до отвору

Для аналізу граничного стану насінини у момент транспортування складемо схему діючих сил. Узагальнена умова динамічної рівноваги насінини на присмоктувальному отворі у проекції на вісь y має такий вигляд [1]:

$$\begin{aligned} \sum X &= 0; & R - N \cdot \cos \beta &= 0; \\ \sum Y &= 0; & F_y - m \cdot g \cdot \sin \alpha - N \cdot \sin \beta &= 0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де R – сила присмоктування насіння;

F_y – відцентрова сила інерції;

α – кутова координата;

N – реакція ребра отвору;

β – кут між N і віссю X .

З огляду на фізику процесу, інтегральне зусилля утримання R є безпосередньою функцією вакуумметричного тиску (розрідження) у робочій порожнині вакуумної камери. Оскільки величина цього тиску є визначальним чинником, що формує агротехнічні показники роботи та стабільність поштучного дозування пневматичного висівного апарата, загальний інженерний розрахунок робочих параметрів системи зводиться до аналітичного визначення мінімально необхідного розрідження.

У механіці взаємодії повітряного потоку з дискретним середовищем (насіenneвим масивом) розрізняють три характерні випадки (стадії) захоплення та присмоктування насінин до робочих отворів розподільного диска, які диференціюють залежно від просторової координати знаходження насінини відносно площини дозувального органа:

1. Первинний контакт у зоні екстремальної близькості

Цей випадок описує умови, за яких насінина перебуває у безпосередній близькості до присмоктувального отвору на відстані, що є сумірною (кратною) з її лінійними розмірами:

$$\Delta P_1 = \frac{\left[1 + 0,8 \cdot \left(\frac{d_{\text{нас}}}{2 \cdot d_{\text{отв}}} \right) - 1,4 \right] \cdot \gamma_{\text{в}} \cdot g_{\text{кр}}^2 \cdot (K - \sin \alpha) \cdot \sqrt{d_{\text{нас}}^2 - d_{\text{отв}}^2}}{1,15 \cdot \left(2 \cdot \frac{d_{\text{нас}}}{d_{\text{отв}}} \right)^{-2,8} \cdot \mu^2 \cdot g \cdot d_0} \quad (3.2)$$

2. Насінина перебуває в процесі безпосереднього присмоктування, будучи захопленою та зафіксованою на ребрах (вхідних кромках) робочого отвору під дією високошвидкісного повітряного потоку

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 = \frac{\gamma_{\text{в}} \cdot g_{\text{кр}}^2 \cdot (K - \sin \alpha) \cdot \sqrt{d_{\text{нас}}^2 - d_{\text{отв}}^2}}{2 \cdot g \cdot \mu^2 \cdot d_{\text{отв}}} \quad (3.3)$$

3. Насіння присмокталось до отвору і обертається разом з диском

$$\Delta P_3 = \frac{4 \cdot m \cdot g \cdot \left(K - \sin \alpha \cdot \sqrt{d_{\text{нас}}^2 - d_{\text{отв}}^2} \right)}{\pi \cdot d_{\text{отв}}^3}, \quad (3.4)$$

де $d_{\text{нас}}$ – діаметр насіння кукурудзи, $d_{\text{нас}} \approx 8,3$ мм для сорту ВІР–42;

m – маса насіння, $m = 334 \cdot 10^{-6}$ кг;

$d_{\text{отв}}$ – діаметр отворів у диску

$$d_{\text{отв}} = (0,6 \dots 0,7) \cdot d_{\text{нас}} = 4,98 \dots 5,81 \text{ мм.}$$

Приймаємо $d_{\text{отв}} = 5,5$ мм;

$\gamma_{\text{в}}$ – питома вага повітря, $\gamma_{\text{в}} = 1,24$ кг/м³ при нормальних умовах;

$\mathcal{G}_{\text{кр}}$ – критична швидкість повітряного потоку, яка рівна швидкості витання насіння

$$\mathcal{G}_{\text{кр}}^{\text{кук}} = 9,8 \div 13,5 \text{ м/с.}$$

Приймаємо 12 м/с;

$K = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}$ – коефіцієнт кінематичного режиму руху диска

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_{\text{д}}}{3 \cdot Q},$$

де $n_{\text{д}}$ – частота обертання висівного диска за заданої норми висіву Q

$$n_{\text{д}} = \frac{Q \cdot \mathcal{G}_{\text{а}}}{Z \cdot (1 - \xi)};$$

$\mathcal{G}_{\text{а}}$ – швидкість руху посівного агрегату, м/с;

Z – кількість отворів у диску, приймаємо $Z = 22$;

ξ – коефіцієнт просковзування $\xi = 0,05 \dots 0,1$.

Проведення подальших теоретичних розрахунків ґрунтується на параметрах, що відповідають типовим агротехнічним вимогам до вирощування просапних культур: задана лінійна щільність розподілу насіннєвого матеріалу в рядку становить $Q = 5,6$ шт./м, а розрахункова поступальна швидкість руху посівного агрегата прийнята на рівні $\mathcal{G}_{\text{а}} = 2,78$ м/с = 10 км/год

$$n_{\text{д}} = \frac{5,6 \cdot 2,78}{22 \cdot (1 - 0,08)} = 0,922 \text{ с}^{-1} \text{ або } n_{\text{д}} = 55,32 \text{ хв}^{-1};$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_d}{30} = \frac{3,14 \cdot 55,32}{30} = 5,79 \text{ с}^{-1}.$$

Тоді

$$K = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} = \frac{5,79^2 \cdot 0,06}{9,81} = 0,205.$$

де r – радіус розташування отворів диску, $r=0,06$ м.

Визначення аналітичних залежностей для розрахунку необхідного вакууметрії (розрідження) у робочій камері виконується для трьох вищезазначених випадків взаємодії за найбільш несприятливих умов – а саме при фазовому куті повороту диска $\alpha=180^\circ$. Ця координата відповідає найвищій точці траєкторії транспортування насінини (верхнє вертикальне положення комірки), де вектор відцентрової сили інерції спрямований колінеарно з вектором сили ваги насінини, а їхня сумарна дія протидіє утримувальному аеродинамічному зусиллю

$$\Delta P_1 = \frac{\left[1 + 0,8 \cdot \left(\frac{8,3}{2 \cdot 5,5} \right)^{-1,4} \right] \cdot 1,24 \cdot 12^2 \cdot (0,205 - \sin 180^\circ) \cdot \sqrt{(8,3 \cdot 10^{-3})^2 - (5,5 \cdot 10^{-3})^2}}{1,15 \cdot \left(2 \cdot \frac{8,3}{5,5} \right)^{-2,8} \cdot 0,8^2 \cdot 9,8 \cdot 5,5} =$$

$$= 367,44 \text{ кг/м}^2 \text{ або } \Delta P_1 = 367 \text{ мм вод. ст.};$$

$$\Delta P_2 = \frac{1,24 \cdot 12^2 \cdot (0,205 - \sin 180^\circ) \cdot \sqrt{(8,3 \cdot 10^{-3})^2 - (5,5 \cdot 10^{-3})^2}}{2 \cdot 9,8 \cdot 0,8^2 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3}} = 9,7 \text{ кг/м}^2,$$

або 10 мм вод ст.

$$\Delta P_3 = \frac{4 \cdot 334 \cdot 10^{-6} \cdot 9,8 \cdot (0,205 - \sin 180^\circ) \cdot \sqrt{(8,3 \cdot 10^{-3})^2 - (5,5 \cdot 10^{-3})^2}}{3,14 \cdot (5,5 \cdot 10^{-3})^3} = 360 \text{ кг/м}^2,$$

або 360 мм вод ст.

3.1.2. Визначення витрат тиску в пневмосистемі

При русі повітря по повітряпроводах тиск витрачається на подолання тертя $P_{тр}$ та подолання місцевих опорів $P_{мо}$

$$P_{\xi} = P_{mp} + P_{mo}. \quad (3.5)$$

Витрати тиску на тертя в круглих трубопроводах

$$P_{mp} = \lambda \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{\gamma \cdot g^2}{2 \cdot g}, \quad (3.6)$$

де l – довжина трубопровода;

D – діаметр трубопровода (найменший 0,032 м);

λ – коефіцієнт опору тертя, виражається в функції числа Рейнольдса

$$\lambda = 0,032 + 0,221 \cdot R_e^{-0,237}, \quad (3.7)$$

де R_e – число Рейнольдса

$$R_e = \frac{D \cdot g}{\nu},$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості при барометричному тиску $P_0=760$ мм вод. ст. і температурі 20 °С, $\nu=0,149 \cdot 10^{-4}$ МР/с;

g – швидкість повітряного потоку в трубопроводі

$$g = 4,04 \cdot \sqrt{h_g}. \quad (3.8)$$

З попередніх розрахунків $g=12$ м/с.

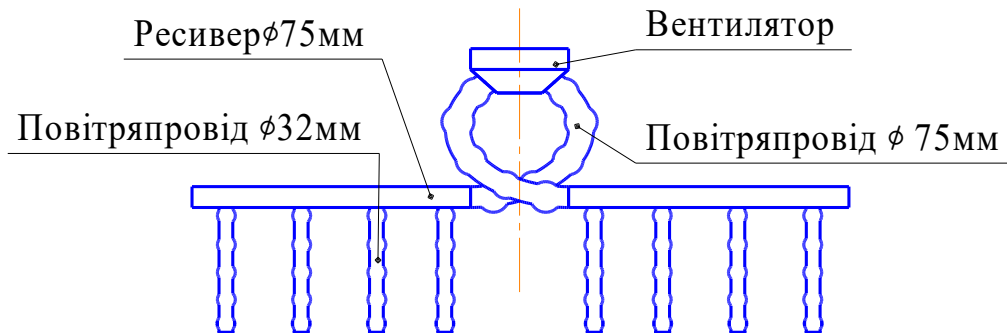


Рис. 3.2. Схема пневмосистеми

– для діаметрів 75 мм:

$$R_e = \frac{0,075 \cdot 12,0}{0,149 \cdot 10^{-4}} = 6,04 \cdot 10^{-4};$$

– для діаметрів 32 мм:

$$R_e = \frac{0,032 \cdot 12,0}{0,149 \cdot 10^{-4}} = 2,58 \cdot 10^{-4}.$$

Витрати тиску на тертя в пневмосистемі становлять:

– для ресивера

$$\lambda = 0,032 + 0,221 \cdot (6,04 \cdot 10^4)^{-0,273} = 0,0482 ;$$

$$P_{mp_1} = 0,0482 \cdot \frac{2,0}{0,075} \cdot 2 \cdot \frac{1,24 \cdot 12^2}{2 \cdot 9,8} = 23,42 \text{ кг/м}^2;$$

– для пневмопроводів діаметром 75 мм

$$P_{mp_2} = 0,0482 \cdot \frac{0,9}{0,075} \cdot 2 \cdot \frac{1,24 \cdot 12^2}{2 \cdot 9,8} = 10,5 \text{ кг/м}^2;$$

– для пневмопроводів діаметром 32 мм

$$\lambda = 0,032 + 0,221 \cdot (2,58 \cdot 10^4)^{-0,273} = 0,052 ;$$

$$P_{mp_2} = 0,052 \cdot \frac{0,7}{0,075} \cdot 2 \cdot \frac{1,24 \cdot 12^2}{2 \cdot 9,8} = 62,17 \text{ кг/м}^2.$$

Сумарні витрати тиску на тертя у повітряпроводах

$$P_{mp} = 23,42 + 10,5 + 62,17 = 96,09 \text{ кг/м}^2 = 942,35 \text{ Па} \approx 0,94 \text{ кПа}.$$

Витрати тиску на подолання місцевих опорів

$$P_{mo} = \xi \cdot \frac{\gamma \cdot g^2}{2 \cdot g}, \quad (3.9)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору.

У загальній структурі газодинамічних втрат вакуумної системи просапної сівалки домінуючими є місцеві опори. Вони виникають у місцях різкої зміни геометрії повітряпроводів – при їхньому раптовому розширенні або звуженні, а також у зонах просторових згинів і поворотів магістралей.

Найбільш критичною ділянкою з погляду втрат напору є раптове розширення повітряпроводу, яке відбувається у вузлі переходу від з'єднувальних патрубків робочих камер висівних апаратів до загального ресивера.

Коефіцієнт місцевого опору:

$$\xi_{p1} = \left(1 + \frac{f}{F}\right)^2,$$

де f – площа перетину повітропрохода

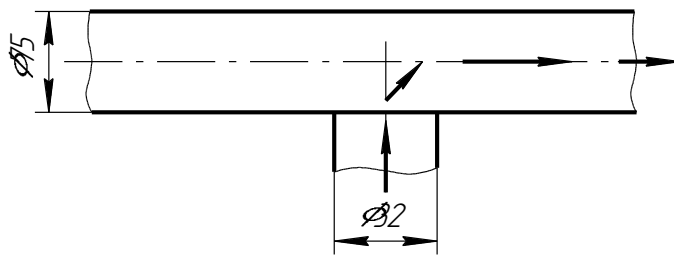


Рис. 3.3. Схема переходу повітряного потоку

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,032^2}{4} = 0,0008 \text{ м}^2;$$

F – площа перетину ресивера:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,075^2}{4} = 0,0044 \text{ м}^2;$$

$$\xi_{p1} = \left(1 + \frac{0,0008}{0,0044} \right)^2 = 1,40;$$

$$P_{\text{мол}} = 1,40 \cdot \frac{1,24 \cdot 12^2}{2 \cdot 9,8} \cdot 6 = 76,53 \text{ кг/м}^2.$$

Згин повітропроводу:

$$\xi_{\kappa} = K_{\kappa} \cdot \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3, \quad (3.10)$$

де K_{κ} – постійний коефіцієнт пропорційності, $K_{\kappa}=0,73$;

ξ_1 – коефіцієнт впливу радіуса заокруглення, R/D ;

ξ_2 – коефіцієнт кута поворота коліна α ;

ξ_3 – коефіцієнт впливу форми перетину. Для круглого перетину $\xi_3=1,0$.

Для

– $R/D=5 \rightarrow \xi_1=0,12$;

– $\alpha=40^\circ \rightarrow \xi_2=0,6$

$$\xi_{\kappa} = 0,73 \cdot 0,12 \cdot 0,6 \cdot 1,0 = 0,053;$$

$$P_{\text{мо2}} = 0,053 \cdot \frac{1,24 \cdot 12^2}{2 \cdot 9,8} \cdot 2 = 0,97 \text{ кг/м}^2;$$

$$P_{\text{мо}} = P_{\text{мо1}} + P_{\text{мо2}} = 76,53 + 0,97 = 77,5 \text{ кг/м}^2 = 77,5 \text{ Па} = 0,078 \text{ кПа}.$$

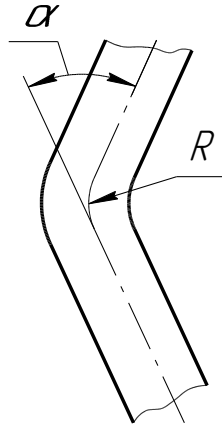


Рис. 3.4. Схема заокруглення

Втрати тиску в пневмосистемі сівалки:

$$P_{\xi} = 0,94 + 0,078 = 1,018 \text{ кПа.}$$

Повне вакуумметричне розрідження, яке повинен забезпечити вентилятор для гарантування якісного і стабільного функціонування пневматичних висівних апаратів під час сівки кукурудзи, визначається сумою всіх видів газодинамічних втрат у системі

$$\sum P = P_a + P_{\xi} = 3604 + 1018 = 4622 \text{ Па} = 4,6 \text{ кПа.}$$

3.1.3. Розрахунок вентилятора

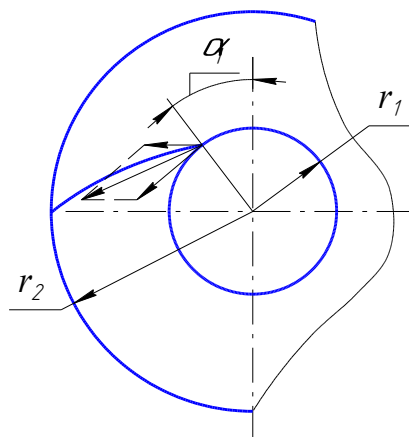


Рис. 3.5. Схема ротора вентилятора

Основними показниками вентилятора є: витрати повітря, швидкість повітря та напор.

Динамічний напор $H_{дин}$

$$H_{дин} = \rho \cdot \frac{g^2}{2}, \quad (3.11)$$

де ρ – щільність повітря;

g – середня швидкість повітря на виході вентилятора, для кукурудзи

$$g = 0,8 \cdot g_{нас} = 0,8 \cdot 18 = 14,4 \text{ м/с},$$

де $g_{нас}$ – швидкість витання насіння

$$\rho = 0,465 \cdot \frac{B}{T}, \quad (3.12)$$

де B – барометричний тиск, $B=760$ мм рт. ст

$$T = 273^\circ + t,$$

де t – температура навколишнього середовища, $t=15$ °С.

Тоді:

$$\rho = 0,465 \cdot \frac{760}{273 + 15} = 1,227 \text{ кг/м}^3.$$

$$H_{дин} = 1,227 \cdot \frac{14,4^2}{2} = 127,2 \text{ кг/м}^2.$$

Статичний тиск

$$H_{ст} = \frac{1 - 0,25^2}{0,25^2} \cdot 127,2 = 1908 \text{ кг/м}^2.$$

Повний тиск буде складати

$$H = H_{дин} + H_{ст} = 127,2 + 1908 = 2035,2 \text{ кг/м}^2.$$

Тоді теоретичний напор з урахуванням витрат в пневмосистемі:

$$H_m = \frac{H}{\eta}, \quad (3.13)$$

де η – ККД пневмосистеми

$$H_m = \frac{2035,2}{0,7} = 2907 \text{ кг/м}^2.$$

Рух повітряного середовища у передпокійній зоні присмоктувального отвору має радіальний напрямок, секундний об'єм повітря, який проходить крізь еквівалентну поверхню вловлювання, визначається за залежністю

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot b \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (3.14)$$

де r_1 – радіус вхідного колектора на вході до вентилятора визначається з умови забезпечення гідродинамічної рівності площ поперечних перерізів магістралей, яка має дорівнювати площі поперечного перерізу вхідного отвору вентилятора

$$\frac{8 \cdot \pi \cdot d}{4} = \frac{\pi \cdot D_o^2}{4},$$

звідки:

$$D_o = \sqrt{8 \cdot d^2} = \sqrt{8 \cdot 32^2} = 90,5 \text{ мм.}$$

Конструктивно приймаємо $D_0=110$ мм, тоді $r_1 = 55$ мм.

b – ширина камери вентилятора, $b=60$ мм;

α – кут між дотичними до поверхні лопатки на вході та напрямком повітря.

Конструкція базового ротора вентилятора має $\alpha=15^\circ$, тоді:

$$Q = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,055 \cdot 0,06 \cdot 14,4 \cdot \cos 15^\circ = 0,288 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Зовнішній діаметр колеса визначаємо з рівняння:

$$D_2 = \frac{2}{n} \sqrt{\frac{H_m}{C_n \cdot \rho}}. \quad (3.15)$$

Приймаємо серійний вентилятор з частотою обертання ротора $n=4100 \text{ хв}^{-1}$ або 67 с^{-1} .

C_n – коефіцієнт, який для радіальних лопаток $C_n=0,27$

$$D_2 = \frac{2}{67} \sqrt{\frac{2907}{0,27 \cdot 1,227}} = 421 \text{ мм.}$$

З урахуванням втрат приймаємо $D_2=450$ мм.

Потужність для привода вентилятора

$$N = \frac{Q \cdot H_T}{75 \cdot \eta}; \quad (3.16)$$

$$N = \frac{0,288 \cdot 2907}{75 \cdot 0,8} = 2,95 \text{ кВт.}$$

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Коротка інструкція з охорони праці при роботі на посівному агрегаті [38–42]

До самостійного виконання робіт із підготовки, налаштування та безпосередньої експлуатації пневмо-механічних сівалок допускаються особи, які досягли 18-річного віку, мають посвідчення тракториста-машиніста відповідної категорії, пройшли медичний огляд для визначення професійної придатності, а також вступний та первинний інструктажі з охорони праці на робочому місці.

Повторний інструктаж з охорони праці проводиться безпосередньо в умовах підприємства не рідше одного разу на три місяці. У разі зміни конструкції висівного агрегату, модернізації його пневмосистеми або після тривалих перерв у роботі (понад 60 днів) оператор повинен пройти позаплановий інструктаж.

Під час роботи з пневмо-механічною сівалкою на механізатора та обслуговуючий персонал (сівальників) можуть впливати такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- рухомі елементи конструкції (карданні вали, приводи висівних дисків, ланцюгові та пасові передачі вентилятора);
- високошвидкісні повітряні потоки (зони створення вакууму та викиду відпрацьованого повітря з пилом);
- хімічні речовини (токсичні протруйники насіння, мікродобрива, пил від графіто-тальнової суміші);
- фізичне перевантаження при завантаженні бункерів вручну;
- підвищений рівень шуму та вібрації від роботи відцентрового вентилятора висіваючих секцій.

Механізатор та допоміжний персонал забезпечуються засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) відповідно до встановлених норм: комбінезон бавовняний (або спеціальний захисний костюм), рукавиці щільні з нитриловим покриттям, захисні окуляри закритого типу (для запобігання ураженню очей пилом протруйника) та респіратор класу захисту не менше FFP2.

Тракторист-машиніст зобов'язаний знати специфіку будови конкретної моделі пневмо-механічної сівалки, правила її агрегування з трактором, схему проходження вакуумних магістралей та місця регулювання скидачів «двійників».

Перед виїздом у поле та безпосереднім з'єднанням сівалки з трактором необхідно ретельно перевірити технічний стан обох одиниць техніки. Трактор повинен бути загальмований за допомогою стоянкового гальма, а під його колеса встановлені противідкатні упори.

При навішуванні сівалки на трьохточкову систему трактора або при з'єднанні причіпного пристрою забороняється перебувати особам між трактором і рамою сівалки. Всі пальці кріплення поздовжніх та центральної тяг повинні бути зафіксовані штатними шплінтами. Використання випадкових предметів (болтів, шматків дроту) категорично заборонено.

Особливу увагу слід приділити перевірці приводного механізму пневмосистеми:

- телескопічний карданний вал приводу вентилятора повинен мати цілісний захисний кожух, зафіксований ланцюжками від прокручування;
- пасовий або ланцюговий привід ротора вентилятора повинен бути закритий суцільним металевим щитком;
- гнучкі повітропроводи (вакуумні шланги) не повинні мати тріщин, перетискань, потертостей та мають бути надійно затиснуті хомутами на патрубках камер висіву та ресивера.

Перевірити стан маркерів та механізму їх переведення. Гідросистема керування маркерами та підйому сівалки повинна бути герметичною, витік робочої рідини в місцях з'єднань штуцерів не допускається.

Провести візуальний огляд завантажувальних бункерів для насіння та добрив. Всередині ємностей не повинно бути сторонніх предметів (інструментів, залишків мішків, каміння). Кришки бункерів повинні щільно закриватися та фіксуватися замками.

Запуск вала відбору потужності (ВВП) трактора для приводу вентилятора сівалки слід виконувати плавно, на мінімальних обертах двигуна, попередньо переконавшись, що поблизу посівного агрегату немає людей. Тільки після цього оберти двигуна доводять до робочих (що забезпечує необхідні частоти обертання вентилятора і рівень вакууму в межах 4,0...6,0 кПа).

Під час руху посівного агрегату категорично забороняється:

- перебувати людям на рамі сівалки, підніжних дошках, сходинках трактора або безпосередньо всередині завантажувальної зони;
- виконувати будь-які регулювання (зміну положення селекторів насіння, налаштування заглиблення сошників чи тиску притискних коліс);
- очищати вручну сошники, загортачі або висіваючі диски від налиплого ґрунту та рослинних решток;
- проводити дозавантаження бункерів насінням чи туками на ходу.

Будь-які технологічні операції з обслуговування (очищення забитих сошників, перевірка ступеня присмоктування насіння до отворів диска, усунення склепінь у бункері) виконуються тільки після повної зупинки агрегату, вимкнення ВВП, глушіння двигуна трактора та фіксації сівалки в опущеному положенні на ґрунт.

Завантаження посівного матеріалу та мінеральних добрив, які пройшли хімічну обробку (пестицидами, фунгіцидами), має здійснюватися виключно з підвітряного боку, щоб мінімізувати потрапляння токсичного пилу в органи дихання. Оператор та помічники зобов'язані працювати в респіраторах та захисних окулярах. Забороняється розрівнювати насіння в бункері незахищеними руками – для цього використовують спеціальні дерев'яні лопатки.

При розворотах посівного агрегату в кінці гону сівалку необхідно повністю підняти у транспортне положення, а маркери підняти за допомогою гідросистеми. Швидкість руху при розвороті не повинна перевищувати 4...5 км/год.

Контроль роботи висівних апаратів за допомогою оптико-електронних систем (моніторів висіву) здійснюється безпосередньо з кабіни трактора. Не

допускається відволікання уваги тракториста від керування рухом для візуального огляду секцій через заднє скло кабіни під час форсованих режимів сівби.

Після завершення зміни посівний агрегат необхідно зупинити на рівному технологічному майданчику, вимкнути привід вентилятора, заглушити двигун трактора та зафіксувати гальма.

Перевести сівалку в стійке транспортне або опорне положення. Якщо сівалка залишається навішеною на тракторі, гідророзподільник слід перевести в положення «заперто», щоб виключити самовільне опускання рами через падіння тиску в гідросистемі.

Повністю видалити залишки посівного матеріалу та мінеральних добрив з туковисівних та насіннєвих бункерів. Не допускається залишати протруєне насіння в ємностях апарату на ніч, оскільки воно може натягнути вологу та забити висівні отвори дисків, а хімікати – викликати корозію металу.

За допомогою стисненого повітря (або спеціальних щіток) ретельно очистити камери висіву, кришки вакуумних камер та дзеркала розподільних дисків від пилу, графіту і залишків хімікатів. Категорично забороняється продувати повітропроводи та камери ротом.

Зняти засоби індивідуального захисту (респіратор, окуляри, рукавиці), очистити їх та скласти у спеціально відведене місце. Ретельно вимити обличчя та руки з милом, при можливості – прийняти душ. Робочий одяг, забруднений протруйниками, не можна зберігати разом із повсякденним одягом.

У разі виявлення будь-яких технічних несправностей під час сівби (сторонній стукіт у корпусі вентилятора, різке падіння вакууму в магістралях, розрив гнучкого шланга, руйнування ланцюгової передачі приводу секцій або витік мастила з гідросистеми) механізатор зобов'язаний негайно зупинити рух агрегату, вимкнути ВВП і глушити двигун.

При виникненні аварійної ситуації, пов'язаної з перекиданням посівного агрегату або руйнуванням елементів зчеплення, необхідно вжити заходів для

стабілізації системи, вимкнути запалювання трактора та за потреби викликати технічну допомогу.

Якщо відбулося просипання значної кількості протруєного насіння чи мінеральних добрив на ґрунт, роботу зупиняють. Забруднений шар ґрунту разом із хімікатами необхідно акуратно зібрати за допомогою лопати у спеціальну тару для подальшої утилізації. Забороняється залишати хімічні речовини відкритою масою на полі через загрозу отруєння дикої фауни та забруднення підземних вод.

У разі травмування обслуговуючого персоналу (захват одягу карданним валом, механічні порізи об диски чи сошники, потрапляння хімікатів в очі чи на шкіру) необхідно:

- негайно зупинити всі механізми;
- надати потерпілому першу долікарську допомогу (при хімічному ураженні очей – рясно промити їх чистою проточною водою протягом 15 хвилин; при кровотечі – накладити тиснучу пов'язку або джгут);
- повідомити про подію безпосереднього керівника робіт;
- за потреби викликати бригаду екстреної медичної допомоги або забезпечити транспортування потерпілого до найближчого медичного закладу.

При виникненні пожежі (займання проводки трактора, паливно-мастильних матеріалів біля гарячих частин двигуна) негайно зупинити роботу, перекрити подачу палива, використовувати бортовий вогнегасник (порошковий або вуглекислотний), пісок чи щільне повстяне покривало.

5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Доцільність впровадження результатів проведених досліджень в конструкцію висівного апарата пневмомеханічної сівалки дозволяє підвищити робочу швидкість руху посівного агрегата до 13,5 км/год.

Проведемо найбільш простий підрахунок – підвищення продуктивності роботи агрегату з базовою та модернізованою сівалками.

Продуктивність агрегата за 1 годину робочого часу з урахуванням використання часу зміни

$$W_o = 0,1 \cdot 10 \cdot 5,6 \cdot 0,78 = 4,37 \text{ га/год};$$

$$W_{np} = 0,1 \cdot 13,5 \cdot 5,6 \cdot 0,78 = 5,89 \text{ га/год}.$$

Економія часу про проведенні посіву кукурудзи на полі площею 100 га

$$\frac{100}{4,37} = 22,88 \text{ год};$$

$$\frac{100}{5,89} = 16,98 \text{ год}.$$

Зекономлений час

$$22,88 - 16,98 = 5,9 \text{ год}.$$

Підвищення продуктивності

$$\frac{5,89 - 4,37}{4,37} \cdot 100 = 34,78 \% \text{ або у } 1,35 \text{ раза}.$$

Таким чином, застосування результатів досліджень в конструкцію висівного апарата дозволить підвищити продуктивність праці та знизити затрати при посіві в 1,35 раза.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі здійснено аналіз конструкцій пневмомеханічних висівних апаратів просапних сівалок, що представлені виробниками на нашому ринку.

У магістерській роботі наведено теоретичне обґрунтування та практичне вирішення актуальної науково-технічної задачі з підвищення продуктивності посівного агрегата шляхом модернізації конструктивно-технологічних параметрів пневмосистеми та висівних робочих органів універсальної просапної сівалки. Основні наукові та практичні результати досліджень полягають у наступному:

Аналіз стану питання показав, що лімітуючим чинником підвищення продуктивності сучасних вітчизняних посівних агрегатів є обмеження робочої швидкості руху через різке погіршення якості поштучного дозування насіння (пропуски, поява «двійників») стандартними пневматичними системами при форсованих режимах роботи.

За результатами багатофакторного експериментального дослідження у середовищі *STATISTICA* та перевірки значущості коефіцієнтів за *t*-критерієм Стюдента і адекватності за критерієм Фішера встановлено локальну область оптимальних параметрів модернізованого апарата для насіння кукурудзи:

величина статичного розрідження у камері: $h_{cm}=2258...2650$ Па;

глибина робочої порожнини вакуумної камери: $H=13...15$ мм ($b_3=0,1781$ – домінуючий чинник впливу);

просторова координата поріжка камери: кут $\gamma=-7^\circ...+8^\circ$ (знак мінус забезпечує максимальну довжину дуги присмоктування);

гранична кутова швидкість розподільного диска із числом комірок $z=14$: $\omega \leq 7,35$ с⁻¹ (частота обертання $n=70$ хв⁻¹).

Конструктивна модернізація елементів пневмосистеми (оптимізація геометрії вакуумної камери за чинниками H та γ , вирівнювання площ гідравлічних перерізів колектора) дозволила забезпечити стабільний коефіцієнт

якісного заповнення отворів диска $\lambda \geq 0,96 \dots 0,98$ без пропусків та здвоєнь на високих швидкостях.

Техніко-економічна оцінка впровадження результатів модернізації підтвердила, що за рахунок обґрунтованого збільшення робочої швидкості посівного агрегата з базових 10,0 км/год до раціональних 13,5 км/год (при повному збереженні агротехнічних вимог до точності поштучного розподілу насіння в рядку), годинна продуктивність посівного агрегата зростає майже в 1,35 рази.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. СІВАЛКИ ТОЧНОГО ВИСІВУ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://elvorti.com/catalog/sivalki-prosapni/?lang=u> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
2. VESTA–8 PROFІ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://elvorti.com/catalog/sivalki-prosapni/vesta-8-profi.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
3. VESTA–6 PROFІ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://elvorti.com/catalog/sivalki-prosapni/vesta-6-profi.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
4. VEGA–6 PROFІ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://elvorti.com/catalog/sivalki-prosapni/vega-6-profi.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
5. Planter–8–01 (СУПН–8–01) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://agro-liga.com/catalog-produkcii/planter-8-01-supn-8-01-s-ezh-sis-moj-na-shestigran/?srsltid=AfmBOoo2TUble6WE0XTEyG40uFh9G_HZaCRsid-swCXC_ZC_c23HA2bE (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
6. Просапні сівалки і точного висіву [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/g2742648-seyalki-propashnye-tochnogo> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
7. Сівалка точного висіву пневматична Весна–4 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/p15553617-seyalka-pnevmaticheskaya-tochnogo.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
8. Сівалка точного висіву пневматична Весна–6 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/p160000097-seyalka-pnevmaticheskaya-tochnogo.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.

9. Сівалка точного висіву пневматична Весна–8 [Електронний ресурс].
– Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/p21927625-seyalka-pnevmaticheskaya-tochnogo.html/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
10. Сівалка точного висіву пневматична Весна–12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/p160009461-seyalka-pnevmaticheskaya-tochnogo.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
11. Сівалка точного висіву пневматична VENZA–6 (анкерна) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/p838189261-seyalka-pnevmaticheskaya-tochnogo.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
12. Сівалка точного висіву пневматична VENZA–8 (анкерна) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/p602745880-seyalka-pnevmaticheskaya-tochnogo.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
13. Сівалка точного висіву пневматична VENZA–6 Pro (дисковий сошник) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/p845134186-seyalka-pnevmaticheskaya-tochnogo.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
14. Сівалка точного висіву пневматична VENZA–8 Pro (mini-till, дисковий сошник) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://favorit-td.com.ua/ua/p597296973-seyalka-pnevmaticheskaya-tochnogo.html> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
15. СІВАЛКА ТОЧНОГО ВИСІВУ "ТОДАК" [Електронний ресурс].
– Режим доступу: <https://www.todak1929.com/stvt> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
16. Сівалки просапні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://harvest.ua/product/sivalky-prosapni/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.

17. Сівалка просапна HERMES–6 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://harvest.ua/product/sivalky-prosapni/hermes-series/ups-6/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
18. Сівалка просапна HERMES–8 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://harvest.ua/product/sivalky-prosapni/hermes-series/ups-8/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
19. Сівалка просапна MULTICORN 560 (01) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://harvest.ua/product/sivalky-prosapni/multicorn-series/multicorn-560-01/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
20. Сівалка просапна MULTICORN 560 PRO (02) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://harvest.ua/product/sivalky-prosapni/multicorn-series/multicorn-560-02/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
21. Сівалка просапна MULTICORN 560 PRO (03) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://harvest.ua/product/sivalky-prosapni/multicorn-series/multicorn-560-03/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
22. SIGMA–KING [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sfoggia.com/ru/semina-di-precisione-2/sigma-king/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
23. Pneumatic Planters Axe Type–PLANTER A [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agromaster.com/en/product/pneumatic-planters-axe-type-planter-a> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
24. Pneumatic Planter Disc Type–PLANTER D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agromaster.com/en/product/pneumatic-planter-disc-type-planter-d> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
25. PRECISION PLANTERS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.monosem.com/precision-planters/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.

26. NC PLANTER [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.monosem.com/precision-planters/single-seed-planter/pneumatic-planter/nc/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
27. MONOSHOX NG PLUS M/ME [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.monosem.com/precision-planters/single-seed-planter/pneumatic-planter/monoshox-ng-plus-m-me/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
28. MONOSHOX NX M/ME [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.monosem.com/precision-planters/single-seed-planter/pneumatic-planter/monoshox-nx-m-me/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
29. Монтована Пневматична Прецизійна Сівалка З Фіксованою Рамою [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.maschiogaspardo.com/uk_uk/mtr.html (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
30. Einzelkorn-Sätechnik [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://amazone.de/de-de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/saetechnik/einzelkorn-saetechnik> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
31. Precea precision air seeder [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.amazone.net/en/products-digital-solutions/agricultural-technology/seeding/precision-sowing-technology/54408-54408/54434> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
32. Сівалки точного висіву серії 1700 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.deere.ua/uk/посів/1700-серія-просапні-сівалки/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.
33. Сівалки точного висіву [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.vaderstad.com/ua/sivalky-tochnogo-vusivu/> (дата звернення: 10.03.2026). – Назва з екрана.

34. Підручник дослідника / О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, К.В. Васильковська, Д.І. Петренко. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. – Кіровоград, Х.: Мачулін, 2016. – 204 с. з іл.
35. Сисолін П.В., Сало В.М., В.М. Кропівний. Сільськогосподарські машини/ Теоретичні основи, конструкція, проектування. Книга 1: Машини для рільництва// За ред. М.І. Черновола. – К.: Урожай, 2001. – 382 с.
36. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с.
37. Войтюк Д.Г., Дубровін В.О., Іщенко Т.Д. та ін. Сільськогосподарські та меліоративні машини// За ред. Д.Г. Войтюка. –К.: Вища освіта, 2004. – 544 с.
38. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. За редакцією М.П. Гандзюка. – К.: Каравела, 2003. – 408 с.
39. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Львів: Афіша, 2002.– 320 с.
40. Войналович О. Охорона праці у сільському господарстві. Навчальний посібник / Войналович О., Білько Т., Марчиниша Є. – К.: Центр навчальної літератури, 2019. – 691 с.
41. Охорона праці при вирощуванні сільськогосподарських культур: Навчальний посібник / М.М. Сакун, В.Ф. Нагорнюк; Одеський державний аграрний університет/. Кафедра безпеки життєдіяльності. – Одеса: «Видавництво», 2009. – 184 с.
42. Основи охорони праці. Курс лекцій: Навчальний посібник для студентів вищих педагогічних навчальних закладів всіх спеціальностей за освітньо–кваліфікаційним рівнем "бакалавр" / А.І. Ткачук, С.М. Богомаз–Назарова. – Перевидання, доповнене та перероблене. – Кропивницький: ПП "Центр оперативної поліграфії "Авангард", 2017. – 156 с.