

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ____ ” _____ 20 ____ р.
Зав. кафедри д.т.н., професор
(науковий ступінь, вчене звання)
Володимир ДІДУР
(підпис) (ініціали, прізвище)

ДИПЛОМНА РОБОТА

магістр

(освітній рівень)

тема роботи «ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВАКУУМУ НА ПРОЦЕС
ПРИСМОКТУВАННЯ НАСІННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ
ВИСІВНОГО АПАРАТА ДЛЯ ПРОСАПНИХ КУЛЬТУР»

Виконав: студент 2 курсу, групи 22 м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7
«Агроінженерія»
Станіслав СЛІПОКУРОВ
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Іван ЛІСОВИЙ.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра агроінженерії

Освітня програма _____ магістр _____

Спеціальність _____ Н7 «Агроінженерія» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Володимир ДІДУР

“ _____ ” _____ 20 ____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

студенту _____ Сліпокурову Станіславу Тарасовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження параметрів вакууму на процес присмокування насіння та удосконалення конструкції висівного апарата для просапних культур» _____

керівник роботи _____ Іван ЛІСОВИЙ, к.т.н., доцент _____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 20.11.2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи: навчальна, наукова та періодична література за темою роботи; _____

4. Перелік питань, які потрібно розробити: _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Едуард Прокопенко, доцент		
Техніко-економічне обґрунтування	Іван ЛІСОВИЙ, доцент		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка

Студент_____
(підпис)**Станіслав СЛІПОКУРОВ**_____
(прізвище та ініціали)**Керівник роботи**_____
(підпис)**Іван ЛІСОВИЙ**_____
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИКО-КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ВИСІВНИХ АПАРАТІВ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО ПРИСМОКТУВАННЯ НАСІННЯ	9
1.1. Агротехнологічні передумови та еволюція методів дозування насіння в пунктирних сівалках	9
1.2. Вплив фізичних параметрів на процес вакуумного присмоктування насіння	13
1.3. Інтегроване комп'ютерне моделювання та чисельний розрахунок робочого процесу висівного апарата	18
1.4. Обґрунтування наукової гіпотези та формування завдань дослідження	19
РОЗДІЛ 2 ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПНЕВМОСИСТЕМИ ВИСІВНОГО АПАРАТА	21
2.1. Динамічний аналіз та розрахункове обґрунтування необхідного вакуумметричного розрідження	21
2.2. Чисельне моделювання нестационарних гідрогазодинамічних процесів у вакуумному тракті	26
2.3. Обґрунтування параметрів та конструкції регулюючого перепускного клапана	31
Висновки до розділу	36
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ПНЕВМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ	38
3.1 Методика та програма лабораторно-польових досліджень	38

3.2. Лабораторні дослідження гідрогазодинамічної стабільності пневмосистеми	40
3.3. Стендові випробування робочого процесу висівного апарата	42
Висновки до розділу	43
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	45
4.1 Ідентифікація та аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації модернізованого пневматичного посівного агрегату	41
4.2 Організаційно-технічний комплекс заходів для зниження шкідливих факторів та забезпечення санітарно-гігієнічних умов праці	46
4.3 Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій та аналіз першопричин ризику при технічній експлуатації посівного агрегату	48
Висновки до розділу	50
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ РЕЗЮМЕ: ОКУПНІСТЬ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПНЕВМОСИСТЕМИ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ СІВАЛКИ	51
5.1. Технічна та продуктивна ефективність	51
5.2 Розрахунок капітальних витрат (K)	51
5.3. Економічна ефективність та окупність	51
Висновки до розділу	52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54
ДОДАТКИ	59

РЕФЕРАТ

Дипломна робота Станіслав СЛІПОКУРОВ присвячена технічному вдосконаленню пневматичних висівних апаратів для забезпечення високоточної сівби просапних культур в умовах підвищених робочих швидкостей [17].

Теоретичне обґрунтування (Розділ 1, 2): Встановлено, що головна причина зниження точності висіву на швидкості — гідрогазодинамічна нестабільність (пульсації тиску P_{sv}) [7]. Наукова новизна полягає у розробці перепускного клапана як активного елемента для усунення цих системних пульсацій та стабілізації тиску.

Експериментальна верифікація (Розділ 3): Доведено, що модернізована система дозволяє підвищити граничну кутову швидкість до $\omega = 7,35 \text{ c}^{-1}$ [10], забезпечуючи при цьому максимальний коефіцієнт однонасінності (P_s) [9, 28]. Визначено оптимальні параметри вакуумної камери для надійного процесу адсорбції насіння [2] (наприклад, $h_{ст} = 2258 \div 2650 \text{ Па}$).

Безпека та Екологія (Розділ 4): Розроблено організаційно-технічні заходи для зниження шкідливих факторів (вібрація [14], шум) та мінімізації ризиків, пов'язаних з протруєним насінням (використання ЗІЗ) [14, 29, 3].

Економічна доцільність (Розділ 5): Підтверджено високий економічний ефект, сформований за рахунок приросту врожайності та збільшення продуктивності. Розрахунок доводить, що капітальні витрати на модернізацію окупляться протягом 1–2 аграрних сезонів.

Ключові слова: АГРОІНЖЕНЕРІЯ; ПНЕВМАТИЧНІ СІВАЛКИ; ВИСОКОТОЧНА СІВБА; СТАБІЛІЗАЦІЯ ТИСКУ; ОДНОНАСІННІСТЬ; ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ВСТУП

Однією з ключових вимог сучасного високопродуктивного агровиробництва є забезпечення високоточної сівби просапних культур на підвищених робочих швидкостях [17, 28]. Швидке та якісне виконання сівби має критичне значення для максимального використання світла, вологи та поживних речовин, що є основою для формування високих врожаїв [18]. Загальний прогрес у галузі сівальних пристроїв орієнтований на чисельні та експериментальні підходи до вдосконалення пневматичних апаратів [1], а також на мінімізацію впливу вібрацій та повітряних потоків на рух насіння [23].

Проте, як показали попередні дослідження, існуючі конструктивно-технологічні схеми пневматичних сівалок зіштовхуються зі значною проблемою: при збільшенні робочої швидкості до $\omega = 7,35 \text{ с}^{-1}$ виникає гідрогазодинамічна нестабільність у системі. Це пов'язано з пульсаціями статичного тиску (P_{sv}), які є результатом асинхронної роботи багаторядкових висівних апаратів [7]. Ця нестабільність призводить до зростання кількості пропусків (P_{sk}) та, відповідно, до зниження коефіцієнта однонасінності (P_s) [9]. Таким чином, розробка та обґрунтування параметрів системи, здатної стабілізувати тиск у пневмосистемі, набуває першочергового значення для агроінженерії [7].

Питанням вдосконалення посівних комплексів присвячено значну кількість праць вітчизняних та закордонних учених. Були проведені дослідження, спрямовані на підвищення точності висіву для різних культур, зокрема кукурудзи [8, 28], рису [16, 24, 25] та овочів [26]. Існуючі підходи часто фокусуються на оптимізації геометрії окремих компонентів: вивчаються механізми адсорбції насіння на диску [2], проводиться DEM-CFD моделювання руху частинок [12], а також оптимізуються конструктивні схеми висівних апаратів та сівалок загалом [5, 6, 11, 13, 15, 19, 20, 27]. Комплексний аналіз якості сівби різних типів агрегатів підтверджує чутливість до налаштувань [22], а математичне моделювання процесів, наприклад, повітряно-центробіжної сепарації, демонструє складність повітряних потоків [10, 21].

Проте, незважаючи на значний прогрес, більшість робіт або обмежуються локальною модернізацією, або не пропонують ефективного, активного регулюючого елемента, здатного усунути системні гідрогазодинамічні пульсації як першопричину нестабільності [7]. Крім того, при впровадженні високошвидкісних технічних рішень необхідно комплексно враховувати екологічні виклики та їх вплив на охорону праці та економіку [4]. Таким чином, наукова проблема полягає у відсутності обґрунтованих параметрів пристрою для активної стабілізації тиску, що є критичним для забезпечення високої якості висіву в умовах високошвидкісної роботи багаторядних пневматичних сівалок.

Мета роботи Теоретично та експериментально обґрунтувати параметри та режим роботи системи автоматичної стабілізації статичного тиску (перепускного клапана) пневматичної сівалки для забезпечення максимально високого коефіцієнта однонасінності (P_s) при роботі на підвищених швидкостях.

Об'єкт дослідження: Технологічний процес висіву насіння просапних культур пневматичними сівалками, робота яких супроводжується динамічною нестабільністю пневматичної системи.

Предмет дослідження: Взаємозв'язок конструктивно-технологічних параметрів вакуумної камери (глибина H , необхідний статичний вакуум $h_{ст}$, положення поріжків) та кінематичних режимів (ω) на якість процесу присмоктування насіння та коефіцієнт однонасінності (P_s) висівного апарата, забезпеченого системою стабілізації тиску (перепускним клапаном).

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИКО-КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ВИСІВНИХ АПАРАТІВ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО ПРИСМОКТУВАННЯ НАСІННЯ

1.1. Агротехнологічні передумови та еволюція методів дозування насіння в пунктирних сівалках

1.1.1. Референтні показники точності та рівномірності сівби просапних культур як фактор формування фізіологічно-оптимального агроценозу

Точність розміщення насіння у посівному рядку є фундаментальною агротехнічною вимогою, що визначає кінцеву густоту стояння рослин, їхню індивідуальну продуктивність та загальний врожай просапних культур [3, 5]. Перехід до пунктирного (однонасіннєвого) висіву вимагає від висівних апаратів здатності гарантувати максимально рівномірний інтервал між насінням, формуючи таким чином фізіологічно-оптимальний агроценоз, де кожна рослина має достатній простір живлення і мінімізується конкуренція [7].

Якість роботи висівного апарата кількісно оцінюється за трьома основними критеріальними показниками, які є об'єктами дослідження та удосконалення у високоточній сівбі:

Коефіцієнт однонасіннєвості (Singulation, P_s). Це головний індикатор точності дозування, який визначає частку насінин, висіяних на правильній, заданій відстані, без утворення двійників чи пропусків [16]. Прагнення до $P_s \rightarrow 100\%$ є ключовим завданням модернізації висівних систем, оскільки висока однонасіннєвість забезпечує рівномірний розвиток кореневої системи та надземної маси, що особливо критично для культур із фіксованою врожайністю (наприклад, цукровий буряк та кукурудза) [22].

Пропуски (Skips, P_{sk}). Показник пропусків являє собою частку місць у рядку, де насінина була відсутня через неспроможність апарата присмоктати або утримати насінину (особливо при високих швидкостях роботи), або через її невірне скидання [12]. Велика кількість пропусків безпосередньо призводить до недовикористання площі живлення і, як наслідок, до прямих та незворотних втрат

врожаю [21]. Зменшення частки пропусків є пріоритетним при проектуванні та оптимізації вакуумних параметрів, що є центральною частиною даного дослідження.

Двійники або Множинний висів (Multiples, P_m). Цей показник фіксує частку точок у рядку, де було висіяно дві або більше насінин одночасно. Присутність двійників викликає жорстку внутрішньовидову конкуренцію між рослинами, що знижує їхню індивідуальну продуктивність і призводить до формування менш якісного врожаю [16, 22]. Удосконалення відсікаючого механізму є основним напрямком боротьби з цим явищем.

Забезпечення високих показників точності (високий P_s при мінімальних P_{sk} та P_m) є особливо складним завданням для пневматичних висівних апаратів, оскільки на їхню роботу критично впливає зміна параметрів вакууму, швидкість обертання диска та фізичні властивості насіннєвого матеріалу [12]. Саме аналіз та оптимізація цього взаємозв'язку стає необхідною передумовою для подальшого інженерного вдосконалення конструкції.

1.1.2. Генезис, конструктивно-функціональна диференціація та порівняльна ефективність пневматичних і пневмомеханічних висівних систем

Історична еволюція висівних апаратів відображає постійне прагнення інженерів до підвищення робочої швидкості та мінімізації помилок дозування (двійників та пропусків). Механічні висівні апарати, що домінували на ранніх етапах, використовували щіткові або осередкові диски, їхня точність була критично залежна від форми насіння і значно знижувалася при швидкості руху агрегату понад 5–6 км/год [6]. Необхідність забезпечення стабільного коефіцієнта однонасіннєвості в умовах інтенсивного землеробства стимулювала розвиток систем, що використовують енергію повітря.

Пневматичні (Вакуумні) Висівні Апарати: Принцип та Переваги

Пневматичні висівні апарати (типу Air-Suction), які стали домінуючими у високоточній сівбі, ґрунтуються на принципі використання вакуумметричного

тиску для індивідуального утримання насінини на отворі обертового диска [16]. Основними перевагами цієї технології є:

Висока універсальність: Вакуумний принцип менш чутливий до неоднорідності форми та розміру насіння (кукурудза, соняшник, ріпак), оскільки сила присмоктування може бути адаптована [17].

Потенціал до високих швидкостей: Високошвидкісні вакуумні сівалки спроектовані для роботи на швидкостях 10–15 км/год і більше, що вимагає глибокого дослідження динаміки взаємодії "вакуум–насіння" [12, 16].

Точність висіву: При оптимальному налаштуванні ці системи демонструють найвищі показники однонасінності серед усіх аналогів [22].

Конструктивно ці апарати класифікуються на пристрої з надлишковим тиском (Air-Pressure) та розрідженням (Air-Suction). Перевагу, особливо для дрібнонасінних культур, має саме вакуумний тип [10, 24].

Концепція Пневмомеханічних Систем

Термін пневмомеханічні висівні системи часто використовується для опису конструкцій, де функція дозування насінини відбувається переважно за рахунок повітря (вакууму), але в процес активно інтегровані механічні елементи для підвищення надійності, зокрема:

Механічні відсікачі (шубери): Використовуються для гарантованого видалення "зайвих" насінин, що присмоктались до одного отвору.

Механізми примусового скидання: Забезпечують коректне звільнення насінини з диску в моменті вимкнення вакууму (наприклад, пружинні або поршневі механізми).

Комбіновані живильники: Як у випадку досліджень, що поєднують механічний забір та пневматичне дозування [25].

Українські наукові роботи активно вивчають саме модернізацію існуючих пневматичних та пневмомеханічних систем, спрямовану на підвищення їхньої надійності та точності, що підтверджується дослідженнями удосконалення конструкцій та вивченням параметрів пневмосистем [1, 2, 4, 15, 27]. Наприклад,

роботи сфокусовані на модернізації окремих вузлів, таких як пневмосистема сівалки чи сам висівний апарат [8, 9, 27].

Порівняльна Ефективність

У порівняльному аспекті, ефективність пневматичних систем значно вища за механічні, особливо при $P_s \rightarrow 100\%$. Однак, підвищення робочої швидкості призводить до збільшення аеродинамічних та відцентрових сил, які вимагають компенсації збільшенням вакуумметричного тиску. Саме тому критичне дослідження оптимального вакууму і його впливу на якість присмоктування (ядро Вашої роботи) є актуальним, оскільки надмірний тиск може призводити до пошкодження насіння або нерівномірності висіву, а недостатній – до пропусків при високих швидкостях [16, 21]. Таким чином, сучасна інженерна думка сфокусована на тонкій оптимізації вакуумного процесу, а не на принциповій зміні пневматичної концепції [19].

1.1.3. Порівняльний аналіз конструкцій висівних апаратів світових виробників: Ідентифікація "критичних місць" при високошвидкісній сівбі

Сучасний ринок посівної техніки представлений високотехнологічними пневматичними системами від провідних світових виробників (Kinze, Horsch, John Deere, Precision Planting, Monosem, Gaspardo), а також вітчизняними модернізованими зразками, що базуються на перевірених схемах [6, 11]. Аналіз їхніх конструктивних рішень дозволяє ідентифікувати ключові вузли, робота яких стає "критичною" при переході до швидкостей сівби понад 10–12 км/год.

Основні конструктивні підходи та їх недоліки при високошвидкісній роботі

Системи з горизонтальним вакуумним диском (Horizontal Disk Seed Meters):

Концепція: Насіння присмоктується до отворів на вертикальній стінці горизонтального диска, що обертається.

"Критичні місця": Прискорення, викликане високою кутовою швидкістю диска, призводить до зростання відцентрових сил. Ці сили починають долати силу присмоктування, збільшуючи ризик відриву насіння від отвору передчасно або, навпаки, ускладнюючи його точне скидання у насіннєпровід [17, 23].

Збільшення вакуумного тиску для компенсації може призвести до деформації насіння або "залипання" [9, 12].

1.2. Вплив фізичних параметрів на процес вакуумного присмокування насіння

1.2.1. Теоретичні засади взаємодії системи

Системи з вертикальним вакуумним диском (Vertical Disk Seed Meters):

Концепція: Диск розташований у вертикальній площині. Часто використовуються в європейських моделях.

"Критичні місця": Основним недоліком є ускладнення процесу заповнення (набору) насіння у камері. При високих швидкостях, інерційні сили насіння у бункері та динаміка його входу у зону присмокування стають нестабільними, що викликає появу пропусків (Psk) [12, 28]. Для вирішення цієї проблеми розробляються спеціальні механізми примусового подавання або використовується технологія "Dual-Side-Disturbance-Facilitated" для активізації заповнення [28].

Системи відсікання та контролю:

Концепція: Використання механічних шуберів або повітряних ножів для видалення зайвих насінин.

"Критичні місця": Усі системи мають високу чутливість до вібрацій і кінематичних похибок [27]. Механічні відсікачі можуть пошкоджувати насіння при високій швидкості обертання [25]. З іншого боку, недостатня ефективність відсікання – головна причина виникнення двійників (Pm) [12, 27]. Сучасні дослідження (зокрема, з використанням DEM-CFD моделювання) спрямовані на оптимізацію форми отворів та геометрії шубера, щоб забезпечити його надійність без контакту з насінням [1, 13].

Ідентифікація "Критичних Місць" у Контексті Дослідження

Аналіз вітчизняних (наприклад, модернізація сівалок типу "Гермес") та зарубіжних розробок [4, 7, 27] вказує, що три ключові "критичні місця" при

високошвидкісній сівбі, які потребують дослідницького втручання, прямо пов'язані з Вашою темою:

Процес Присмоктування та Утримання (Критичний Вакуум): Необхідність визначення оптимального вакуумметричного тиску, який, з одного боку, долає зростаючі відцентрові сили, а з іншого — не викликає множинний висів або пошкодження насіння [9, 12].

Фаза Скидання (Release Phase): Точний момент відключення вакууму та траєкторія руху насіння після виходу з диска. Ця фаза критично впливає на рівномірність розміщення насіння у насіннєпроводі та знижує його кінематичну енергію, що є предметом удосконалення [14, 25].

Конструкція Набірно-Відсікаючої Зони: Удосконалення геометрії каналів та механізмів подачі/відсікання для забезпечення однонасіннєвого набору навіть при нестабільних умовах у бункері та високій швидкості роботи [28, 27].

Таким чином, інженерна модернізація сфокусована на оптимізації гідродинамічних процесів усередині висівного апарата, що є прямим напрямом Вашої роботи.

1.2.2. Інженерні стратегії мінімізації множинного висіву та гідродинамічний контроль кінематики насіння у фазі скидання

Фаза скидання насіння (Seed Release Phase) є заключним і критично важливим етапом роботи висівного апарата, що безпосередньо впливає на точність розподілу насіння у ґрунті, а також на мінімізацію двійників (P_m) та пропусків (P_{sk}) [12, 25, 27]. Оптимізація цієї фази включає дві ключові інженерні стратегії: гарантоване видалення зайвих насінин та контроль траєкторії руху насіння після її звільнення з вакуумного диска.

I. Удосконалення механізмів сепарації та відсікання (Шубери) Основним завданням механізму відсікання (шубера) є забезпечення високого коефіцієнта однонасіннєвості (P_s) шляхом видалення додаткових насінин, які могли присмоктатися до одного отвору диску (явище множинного набору) [27].

Принцип дії: Шубери (механічні язички, щітки, коліщата) є елементами, що контактують з насінневою масою і зсувають "зайві" насінини назад у бункер, залишаючи на диску лише одну [25, 27].

"Критичні місця" при високошвидкісній сівбі: При значних швидкостях обертання диску контакт шубера з насінням може призводити до пошкодження насінневої оболонки [25]. Крім того, зростаючі вібрації посівного агрегату (предмет дослідження в [7]) можуть порушувати стабільність контакту шубера, що викликає помилки дозування – зростання двійників (при недостатній ефективності) або пропусків (при надто жорсткому налаштуванні) [8, 27].

Конструктивні інновації: Сучасні дослідження використовують чисельні методи (DEM-CFD) для оптимізації геометрії шубера та його розміщення, щоб підвищити ефективність сепарації без надмірного травмування насіння [12, 1]. Деякі системи, як-от Dual-Side-Disturbance-Facilitated [28], поєднують активне збурення насінневої маси у камері, щоб вже на етапі набору знизити ймовірність присмоктування кількох насінин, чим зменшують навантаження на шубер.

II. Гідродинамічний контроль кінематики насіння у фазі звільнення Фаза звільнення насінини розпочинається, коли вакуумний отвір виходить із зони дії розрідження [17]. У цьому моменті насінина повинна бути точно спрямована у насіннепровід [25].

Проблема кінематики: При високих робочих швидкостях сівби, насінина набуває значної горизонтальної кінематичної енергії від обертання диску. Якщо її скидання відбувається без контролю, це призводить до відскоку від дна борозни або нерівномірного розташування, знижуючи кінцеву якість сівби [16, 25].

Вирішення: Системи примусового скидання:

"Повітряні ножі" (Air Knives): Це інноваційне рішення, яке застосовує короткий імпульс надлишкового тиску (blow-off air) у вакуумний отвір у моменті скидання. Це забезпечує активне та контрольоване виштовхування насінини з диску, компенсуючи її горизонтальну швидкість, що критично важливо для збереження точного інтервалу у рядку [17, 24].

Механічні відбійники (Ejectors): Спеціалізовані механізми (наприклад, поршневого типу), які примусово виштовхують насінину, забезпечуючи її коректне падіння. Це рішення часто використовується у комбінованих пневмомеханічних системах [25, 15].

Ефективність фази скидання є функцією точного узгодження гідродинамічних параметрів (вакуум, надлишковий тиск) з конструктивними параметрами (геометрія вакуумного диска, розміщення зони відключення вакууму) [16]. Таким чином, аналіз цих конструктивних рішень дає підґрунтя для постановки експериментальних завдань щодо удосконалення висівного апарата.

1.2.3. Застосування інтелектуальних методів (ANN, регресійні моделі) для оцінки раціонального вакуумного тиску

У контексті високошвидкісної точної сівби, де динамічні сили, що діють на насінину, постійно змінюються, визначення раціонального (оптимального) вакуумного тиску (ΔP_{opt}) є критичною задачею, що забезпечує максимальний коефіцієнт однонасінності (P_s) при мінімальних пропусках (P_{sk}) і двійниках (P_m) [9, 17]. Традиційні емпіричні методи та класичні аналітичні моделі часто виявляються недостатніми для охоплення комплексної взаємодії численних факторів, що обумовлює необхідність застосування інтелектуальних методів та комп'ютерного моделювання.

Роль інтелектуальних методів у пошуку оптимальних параметрів На якість дозування пневматичного апарата впливають не тільки робоча швидкість і вакуум, але й фізико-механічні властивості насіння (розмір, форма, коефіцієнт тертя) [2, 17]. Ці взаємозв'язки є нелінійними та багатофакторними, що робить їх ідеальним полем для застосування сучасних інтелектуальних підходів:

Моделі на основі штучних нейронних мереж (ANN – Artificial Neural Network):

Принцип: ANN здатні виявляти складні, неявні та нелінійні взаємозв'язки між вхідними параметрами (швидкість обертання диска, вакуумний тиск, фізичні властивості насіння) та вихідними показниками якості сівби (P_s , P_{sk} , P_m).

Застосування: Дослідження підтверджують ефективність ANN для прогнозування та оцінки оптимального вакуумного тиску (ΔP_{opt}) для повітряно-всмоктуючих висівних апаратів. Нейромережеві моделі, навчені на експериментальних даних, можуть точно вказувати на діапазон тиску, який максимізує P_s для конкретного типу насіння [9].

Регресійні та поверхневі моделі (Regression and Response Surface Models):

Принцип: Ці статистичні методи використовуються для встановлення кількісних зв'язків між змінними. Хоча вони простіші за ANN, вони є фундаментальними для обґрунтування емпіричних залежностей [16].

Застосування: Регресійні моделі дозволяють точно визначити, як зміна вакууму впливає на P_s та P_m , що є основою для інженерних розрахунків. Наприклад, дослідження використовують аналіз поверхні відгуку (RSM) для оптимізації конструктивних параметрів та вакууму в апаратах із подвійними отворами, забезпечуючи максимальну точність [16].

Інтегровані підходи (DEM-CFD). Окреме місце в аналізі займають методи комплексного моделювання, такі як DEM-CFD (Discrete Element Method – Computational Fluid Dynamics) [12, 23]. Ці методи не є інтелектуальними у сенсі ANN, але вони дозволяють візуалізувати та чисельно оцінити взаємодію системи "вакуумний отвір – насінина" в реальному часі.

Функціонал: DEM-CFD моделювання дає можливість імітувати рух насіння у камері, вплив вакууму та повітряних потоків, а також динаміку присмоктування і відсікання.

Результат: Завдяки цьому можна теоретично обґрунтувати геометричні параметри отворів і визначити приблизний діапазон ΔP_{crit} ще до початку фізичних випробувань, значно прискорюючи процес досліджень [12, 23].

Застосування інтелектуальних методів, особливо ANN, є ключовим для переходу від емпіричного підбору вакууму до його раціонального науково-обґрунтованого визначення. Це дозволяє створювати висівні апарати, які автоматично адаптують ΔP_{opt} залежно від робочої швидкості та характеристик насіння, що є майбутнім високоточного землеробства [7, 9].

1.3. Інтегроване комп'ютерне моделювання та чисельний розрахунок робочого процесу висівного апарата

Для підвищення точності пунктирного висіву на високих швидкостях недостатньо лише емпіричних випробувань. Сучасна інженерна думка використовує комплексне чисельне моделювання, що дозволяє візуалізувати та кількісно оцінити складні фізичні процеси (взаємодію повітря–насіння), які неможливо якісно дослідити в польових умовах [1, 12, 23]. Комп'ютерне моделювання є основою для теоретичного обґрунтування параметрів удосконаленої конструкції висівного апарата [1].

1.3.1. Застосування методів дискретних елементів та обчислювальної гідродинаміки (DEM-CFD)

Найбільш прогресивним підходом у моделюванні роботи пневматичних висівних апаратів є використання інтегрованого моделювання DEM-CFD (Discrete Element Method – Computational Fluid Dynamics).

CFD (Обчислювальна гідродинаміка): Цей метод використовується для точного розрахунку повітряного потоку (вакууму) всередині камери дозування та через отвори диска. CFD дозволяє визначити розподіл тиску та швидкість повітря у зоні присмоктування і, що важливо, у зоні відключення вакууму, де повітряний потік впливає на фазу скидання [1, 12].

DEM (Метод дискретних елементів): DEM застосовується для моделювання руху окремих насінин як дискретних частинок. Він враховує зіткнення насінин між собою (у насіннєвій камері), їхню взаємодію з робочими поверхнями (диском, шубером) та гравітаційні сили [23].

DEM-CFD Coupling: Інтеграція цих двох методів (двостороннє зв'язування) є критично важливою, оскільки дозволяє коректно врахувати вплив повітряного потоку (вакууму) на кінематику насіння (DEM-частинок) [12]. Це дає можливість:

Визначати оптимальну геометрію отворів на диску для мінімізації подвійного набору [23].

Моделювати процес заповнення (набору) насіння та ідентифікувати причини пропусків при високих швидкостях [12, 28].

Аналізувати ефективність роботи шубера та інших відсікаючих механізмів, оцінюючи ризик травмування насіння [1].

1.3.2. Теоретичні розрахунки та кінематичний аналіз

Крім складного чисельного моделювання, робота висівного апарата потребує фундаментального кінематичного та динамічного розрахунку [16, 21]:

Кінематика насіння: Визначається траєкторія руху насінини від моменту її присмоктування до падіння у насіннєпровід. Аналіз кінематики допомагає узгодити швидкість обертання диска з робочою швидкістю сівалки, щоб забезпечити нульову відносну швидкість насінини у момент контакту з ґрунтом, тим самим підвищуючи рівномірність розміщення [16, 25].

Динамічний розрахунок: Включає розрахунок сил, що діють на насінину (сила присмоктування, відцентрова, тертя) [17]. Це є основою для обґрунтування мінімального (критичного) вакуумметричного розрідження (ΔP_{crit}) [2, 16], яке гарантує утримання насінини при заданих робочих параметрах.

Таким чином, комп'ютерне моделювання (особливо DEM-CFD) та теоретичні розрахунки є необхідними інструментами для глибокого розуміння фізики процесу і дозволяють науково обґрунтувати параметри удосконаленої конструкції висівного апарата [1, 7].

1.4. Обґрунтування наукової гіпотези та формування завдань дослідження

Встановлення та оптимізація параметрів і режиму роботи системи автоматичної стабілізації статичного тиску (перепускного клапана) у пневматичній системі сівалки дозволить усунути пульсації P_{sv} та забезпечити

максимально високий коефіцієнт однонасінності (P_s) при роботі на підвищених швидкостях (до $\omega = 7,35 \text{ c}^{-1}$ і вище).

Для підтвердження висунутої гіпотези та досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні завдання:

Теоретично обґрунтувати процеси виникнення нестабільності тиску в пневматичній системі сівалки, що працює з кількома висівними апаратами, та визначити раціональні режими її роботи.

Розробити математичну модель модернізованої пневматичної системи з урахуванням інтеграції перепускного клапана для визначення його оптимальних конструктивних параметрів та стабільного статичного тиску [7].

Розробити та виготовити експериментальний зразок модернізованого перепускного клапана і здійснити його монтаж на пневматичний посівний агрегат.

Провести експериментальні дослідження впливу стабілізації тиску на якість висіву (P_s) при підвищених кутових швидкостях (ω) висівного диска [10], а також визначити оптимальне робоче розрідження [9].

Розробити організаційно-технічні заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації модернізованого агрегату, враховуючи підвищені динамічні навантаження та вимоги охорони праці [3, 14].

Здійснити техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження модернізації на основі показників підвищення якості висіву та продуктивності [5.3].

РОЗДІЛ 2. ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПНЕВМОСИСТЕМИ ВИСІВНОГО АПАРАТА

2.1. Динамічний аналіз та розрахункове обґрунтування необхідного вакуумметричного розрідження

2.1.1. Математичне моделювання силового балансу насінини на висівному диску: врахування відцентрової та гравітаційної складових

Теоретичне обґрунтування параметрів роботи пневматичного висівного апарата неможливе без точного динамічного аналізу сил, що діють на насінину в процесі її утримання на обертовому диску [17, 2]. Ключова умова надійної роботи полягає у забезпеченні силового балансу, де утримуюча сила присмоктування (F_{vac}) має гарантовано перевищувати суму всіх дестабілізуючих (відривних) сил у найнесприятливішій точці робочого сектора.

Основні динамічні складові. На насінину масою m , присмоктану до отвору висівного диска радіусом R та кутовою швидкістю ω , діють три основні сили, які мають бути враховані в моделі [2, 17]:

Сила присмоктування (F_{vac}): Це головна утримуюча сила, яка виникає внаслідок дії вакуумметричного розрідження (ΔP). Вона спрямована перпендикулярно до площини диска і розраховується як:

$$F_{vac} = \Delta P \cdot A_{eff} \quad (2.1)$$

Де A_{eff} – ефективна площа контакту насінини з отвором [2, 16].

Відцентрова сила (F_c): Домінуюча відривна сила при високошвидкісній сівбі. Вона спрямована від центру обертання диска і зростає квадратично зі швидкістю ω [17]:

$$F_c = m \cdot R \cdot \omega^2 \quad (2.2)$$

Збільшення F_c є ключовим фактором, що вимагає підвищення ΔP при зростанні робочої швидкості агрегату [8, 12].

Сила тяжіння (G): Спрямована вертикально вниз. Її вплив на відрив залежить від кута повороту диска (α) відносно вертикальної осі [17]:

$$G = m \cdot g \quad (2.3)$$

Математична модель силового балансу

Умова стабільного утримання насінини вимагає, щоб утримуюча сила (F_{vac}) була більшою за радіальні та тангенціальні складові всіх відривних сил.

У найнесприятливішій точці (зазвичай у верхньому секторі диска, де радіальна складова сили тяжіння G_r додається до відцентрової сили F_c), дестабілізуюча радіальна сила (F_{rad}) є максимальною:

$$F_{rad} = F_c + G \cdot \sin(\alpha) \quad (2.4)$$

Для забезпечення надійного утримання насінини, необхідно, щоб F_{vac} компенсувала всі відривні сили з необхідним коефіцієнтом запасу міцності ($K_{запас}$), який враховує вібрації [14], динамічні коливання вакууму та нерівності форми насіння:

$$F_{vac} \geq (F_c + G \cdot \sin(\alpha)) \cdot K_{запас} \quad (2.5)$$

Підставивши вирази (2.1), (2.2) і (2.3) у рівняння (2.5), отримаємо загальну умову для розрахунку мінімально необхідного вакуумметричного розрідження (ΔP):

$$\Delta P \cdot A_{eff} \geq (m \cdot R \cdot \omega^2 + m \cdot g \cdot \sin(\alpha)) \cdot K_{запас} \quad (2.6)$$

Це рівняння є основою для виведення формули критичного розрідження (ΔP_{crit}), яке буде детально розглянуто у наступному підрозділі.

2.1.2. Виведення розрахункової залежності критичного розрідження (ΔP_{crit}) для гарантованого утримання посівного матеріалу на високих швидкостях

Визначення критичного вакуумметричного розрідження (ΔP_{crit}) є ключовим теоретичним завданням, оскільки ця величина встановлює мінімально необхідний тиск для запобігання зриву насіння з отворів висівного диска під дією динамічних навантажень [17].

ΔP_{crit} виводиться з умови граничної рівноваги сил, де сила присмоктування (F_{vac}) дорівнює максимальній сумі всіх відривних сил, помноженій на коефіцієнт запасу міцності ($K_{запас}$) [2, 16].

Умова граничної рівноваги. Згідно з математичною моделлю силового балансу, розробленій у підрозділі 2.1.1 (рівняння 2.6), умова надійного утримання насінини має вигляд:

Для визначення ΔP_{crit} , необхідно знайти таку точку на траєкторії руху диска, де відривна сила є максимальною. Це відбувається у верхньому положенні диска (якщо він вертикальний або має вертикальну складову), де радіальна складова сили тяжіння спрямована від центру обертання та додається до відцентрової сили F_c [17].

У цій точці кут нахилу (α) дорівнює 90° (або 270° , але $\sin(\alpha)$ залишається 1). Отже, $\sin(\alpha) = 1$, і відривна сила є найбільшою.

Переходячи до рівності та підставляючи $\sin(\alpha) = 1$, отримаємо:

$$F_{vac_crit} = (m \cdot R \cdot \omega^2 + m \cdot g) \cdot K_{запас} \quad (2.7)$$

Виведення формули критичного розрідження Підставивши вираз для F_{vac} (2.1) у граничну умову (2.7), отримуємо формулу для розрахунку критичного розрідження (ΔP_{crit}):

$$\Delta P_{crit} \cdot A_{eff} = (m \cdot R \cdot \omega^2 + m \cdot g) \cdot K_{запас} \quad (2.8)$$

Звідси, розрахункова залежність критичного вакуумметричного розрідження має вигляд:

$$\Delta P_{crit} = \frac{m \cdot (R \cdot \omega^2 + g) \cdot K_{запас}}{A_{eff}} \quad (2.9)$$

Де: ΔP_{crit} — критичне вакуумметричне розрідження, необхідне для утримання насінини, Па; m — маса насінини, кг; R — радіус розташування отворів висівного диска, м; ω — кутова швидкість обертання диска, s^{-1} (пов'язана з робочою швидкістю сівалки); g — прискорення вільного падіння, 9.81 м/с^2 ; A_{eff} — ефективна площа присмоктування насінини до отвору, m^2 ; $K_{запас}$ — коефіцієнт запасу міцності ($K_{запас} > 1.0$), що враховує динамічні коливання, вібрації (згідно [14]) та похибки форми насіння.

Таким чином, формула (2.9) чітко показує, що ΔP_{crit} є квадратично залежним від кутової швидкості обертання диска (ω) [8, 12]. Для роботи на високих швидкостях (коли ω значно зростає), необхідно різко збільшувати розрідження, що, у свою чергу, підвищує ризик виникнення двійників (P_m) і накладає підвищені вимоги до системи відсікання [9, 27].

2.1.3. Обґрунтування необхідного запасу міцності присмоктування для мінімізації пропусків (P_{sk}) та його зв'язку з фізичними властивостями насіння

Визначення критичного розрідження (ΔP_{crit}) за формулою (2.9) дає лише мінімально необхідний тиск для запобігання зриву насінини в ідеальних умовах. У реальних умовах роботи висівного апарата, особливо на високих швидкостях, необхідно використовувати коефіцієнт запасу міцності присмоктування ($K_{запас}$), який забезпечує надійне утримання насіння та мінімізує кількість пропусків (P_{sk}) [17].

Фактори, що обумовлюють необхідність $K_{\text{запас}}$. Коефіцієнт запасу міцності ($K_{\text{запас}}$), який завжди є більшим за одиницю ($K_{\text{запас}} > 1$), вводиться для компенсації низки нестационарних та неврахованих динамічних факторів [17]:

Нестабільність вакууму (Пульсації тиску): Робота багаторядкової сівалки супроводжується постійними коливаннями статичного тиску у пневмосистемі (згідно з [7]), оскільки отвори різних висівних дисків послідовно перекриваються та звільняються. $K_{\text{запас}}$ забезпечує надійне присмоктування навіть при короткочасних локальних падіннях тиску нижче ΔP_{crit} .

Вібраційні навантаження: На високих робочих швидкостях вібрації, що передаються від шасі та робочих органів, можуть призводити до миттєвого відокремлення насінини від диску [14]. $K_{\text{запас}}$ є прямою протидією цим додатковим інерційним силам, що посилюють відрив [14].

Похибки форми насіння та зменшення ефективної площі: Насіння просапних культур рідко має ідеальну форму. Для насінин неправильної, загостреної або грубої форми ефективна площа присмоктування (A_{eff}) може бути значно меншою за теоретичну розрахункову, що зменшує фактичну силу $F_{\text{вас}}$. $K_{\text{запас}}$ компенсує цю змінну величину [2, 17].

Взаємозв'язок $K_{\text{запас}}$ з властивостями насіння та P_{sk} . Величина $K_{\text{запас}}$ залежить від фізико-механічних характеристик посівного матеріалу, які впливають на якість контакту та величину відривних сил:

Маса насінини (m): Чим важча насінина, тим більші сили F_c та G діють на неї. Це вимагає пропорційно більшого запасу міцності, щоб запобігти зриву і мінімізувати пропуски (P_{sk}).

Нерівномірність форми та розміру: Значна різниця у формі та розмірі насінин у партії вимагає встановлення такого $K_{\text{запас}}$, який забезпечить утримання найменших або найбільш незручних для присмоктування екземплярів [2]. Це дозволяє підтримувати $P_{\text{sk}} \rightarrow 0$ для всієї насінневої маси.

Оптимізація робочого тиску. Надмірне збільшення $K_{\text{запас}}$ призводить до зростання фактичного робочого розрідження $\Delta P_{\text{роб}}$):

$$\Delta P_{\text{роб}} = \Delta P_{\text{crit}} \cdot K_{\text{запас}} \quad (2.10)$$

Хоча це гарантує мінімізацію пропусків ($P_{sk} \rightarrow 0$), надмірний тиск різко підвищує ймовірність множинного висіву (зростання P_m) [9, 27]. Таким чином, інженерна задача полягає у виборі раціонального (оптимального) коефіцієнта запасу ($K_{\text{запас}}$), який балансує між P_{sk} (пропусками) і P_m (двійниками).

Практичні дослідження часто використовують $K_{\text{запас}}$ в діапазоні 1.1 – 1.3, проте для точного обґрунтування цього значення застосовуються інтелектуальні методи, такі як моделі на основі штучних нейронних мереж (ANN) [9], що дозволяють визначити оптимальний $\Delta P_{\text{роб}}$ для конкретних умов роботи.

2.2. Чисельне моделювання нестационарних гідрогазодинамічних процесів у вакуумному тракті

2.2.1. Ідентифікація та аналіз джерела пульсацій: Динаміка зміни статичного тиску в пневмосистемі, спричинена послідовним перекриванням/відкриванням отворів висівних дисків (зміна витрати повітря, G_{mm})

Робочий процес багаторядкової пневматичної сівалки (наприклад, з восьми висівними апаратами, як зазначено у [7]) характеризується нестационарністю гідрогазодинамічних процесів, ключовим проявом якої є пульсація статичного тиску у вакуумному тракті [17]. Ця динамічна нестабільність є головним чинником, що ускладнює підтримання раціонального вакуумметричного розрідження ($\Delta P_{\text{роб}}$), необхідного для надійного утримання насіння [9].

Механізм виникнення пульсацій. Джерелом пульсацій є циклічна та несинхронізована зміна активного робочого об'єму пневмосистеми. У багаторядному висівному апараті зміна тиску виникає внаслідок постійної і нерівномірної зміни загальної витрати повітря (G_{mm}) через систему:

Присмоктування насіння (Перекивання отвору): Коли насінина перекидає вакуумний отвір на висівному диску, витрата повітря через цей отвір різко зменшується.

Скидання насіння (Відкривання отвору): Коли насінина скидається, отвір на короткий час відкривається, викликаючи короткочасний пік витрати повітря.

Оскільки кожен із восьми висівних апаратів працює за власною програмою (фазовий зсув обертання дисків) і процес присмоктування насіння відбувається несинхронно, сумарна миттєва витрата повітря (G_{mm}) через вакуумну лінію постійно коливається [7].

$$\Delta G_{mm} = \sum_{i=1}^n (G_{mm,open,i} - G_{mm,closed,i}) \quad (2.11)$$

Де n — кількість висівних апаратів; $G_{mm, open}$ та $G_{mm, closed}$ — витрата повітря при відкритому та закритому отворі відповідно.

Кількісна оцінка динаміки тиску

Ця зміна витрати повітря (G_{mm}) призводить до прямої зміни статичного тиску (P_{sv}) в усій пневматичній системі. Навіть при наявності Вакуумного Регулюючого Вентиля (ВРВ), який намагається підтримувати заданий тиск, він працює стабільно лише у певному інтервалі витрати повітря [7].

Наприклад, як зазначено в чисельних дослідженнях ([7]), моделювання розглядає критичні значення витрати:

Мінімальна витрата: $G_{mm} = 0,0248 \text{ кг/с}$

Максимальна витрата: $G_{mm} = 0,046 \text{ кг/с}$

Значна різниця між цими значеннями призводить до коливань статичного тиску, що погіршує умови присмоктування. При цьому, навіть якщо статичний тиск P_{sv} (наприклад, 86930 Па) підтримується номінально, ці динамічні коливання прямо впливають на швидкість повітряного потоку в районі отвору ($\omega = 116,4 \text{ м/с}$) [7], що, у свою чергу, змінює фактичну утримуючу силу (F_{vac}).

Наслідки пульсацій для якості сівби

Коливання статичного тиску створюють нестабільність сили присмоктування F_{vac} [17].

Збільшення пропусків (P_{sk}): Короткочасне падіння статичного тиску нижче ΔP_{crit} (критичного розрідження) може призвести до зриву насінини з отвору, що збільшує кількість пропусків.

Збільшення двійників (P_m): Надмірне короткочасне зростання тиску вище ΔP_{opt} може ускладнити роботу механізму відсікання (шубера) і сприяти захопленню двох насінин.

Саме тому необхідне конструктивне рішення, таке як використання перепускного клапана (предмет аналізу в 2.3), для гасіння цих гідрогазодинамічних пульсацій і забезпечення стабільності тиску незалежно від динаміки G_{mm} [7].

2.2.2. Комп'ютерне моделювання повітряного потоку в пневматичній камері висівного апарата

Для детального аналізу та оптимізації роботи пневматичного висівного апарата, особливо в умовах нестационарності, спричиненої пульсаціями тиску (2.2.1), застосування комп'ютерного моделювання повітряного потоку є необхідним етапом [1, 12]. Метод Обчислювальної гідродинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics) дає можливість візуалізувати та кількісно оцінити складні гідрогазодинамічні процеси всередині вакуумного тракту, що безпосередньо впливають на силу присмоктування F_{vac} [1, 23].

Методологія та інструментарій моделювання Чисельне моделювання пневматичної камери та перепускного клапана (як частини пневмосистеми) проводиться з використанням спеціалізованих програмних комплексів, таких як Solidworks (для створення 3D-моделі) та ANSYS CFX (для розрахунку гідрогазодинамічних процесів) [7].

Основними цілями CFD-моделювання є: Визначення поля тиску (P): Розрахунок розподілу статичного та повного тиску всередині вакуумної камери

для обґрунтування зони дії розрідження та ефективності регулюючого клапана [12].

Визначення поля швидкості (V): Розрахунок швидкості повітряного потоку в районі отворів диска, що безпосередньо формує утримуючу силу F_{vac} .

Аналіз нестационарності: Моделювання зміни параметрів потоку у відповідь на динамічні зміни витрати повітря (G_{mm}).

Аналіз впливу динаміки витрати повітря. Як було зазначено у підрозділі 2.2.1, пульсації тиску виникають через коливання загальної витрати повітря (G_{mm}), спричинені послідовним відкриванням/закриванням отворів на восьми висівних апаратах. CFD-моделювання дозволяє кількісно оцінити вплив цих екстремальних станів:

Мінімальна витрата ($G_{mm} = 0,0248 \text{ кг/с}$): Цей стан відповідає ситуації, коли більшість отворів перекрита насінням. Моделювання показує розподіл тиску та швидкості в умовах низького навантаження на вакуумний тракт [7] (додаток А).

Максимальна витрата ($G_{mm} = 0,046 \text{ кг/с}$): Цей стан імітує ситуацію, коли значна частина отворів (наприклад, у фазі скидання) є відкритою, що призводить до падіння статичного тиску P_{sv} та змін швидкості повітряного потоку [7] (додаток А).

Чисельний розрахунок показує, що при номінальному статичному тиску в камері, наприклад, $P_{sv} = 86930 \text{ Па}$, швидкість повітряного потоку в районі отвору диска може досягати значень, наприклад, $\omega = 116,4 \text{ м/с}$ [7]. Будь-яке відхилення від цих розрахункових параметрів через гідродинамічні пульсації призводить до зміни F_{vac} і, як наслідок, до збільшення помилок дозування (пропусків P_{sk} або двійників P_m) [12, 1].

Обґрунтування конструктивних рішень. Результати CFD-моделювання слугують основою для обґрунтування необхідності та параметрів конструктивних рішень. Зокрема, моделювання динаміки потоку та тиску підтверджує, що для досягнення стабільності присмоктування необхідно ввести зовнішній регулюючий елемент. Це виводить на необхідність моделювання перепускного

клапана у структурі пневмосистеми для гасіння цих коливань, що дозволить підтримувати $\Delta P_{роб}$ на раціональному рівні [7].

2.2.3. Чисельний аналіз впливу нестабільного тиску на параметри присмоктування та швидкість повітряного потоку в районі отвору

Чисельний аналіз, проведений за допомогою методів CFD (Обчислювальної гідродинаміки) (2.2.2), дозволяє кількісно визначити прямий взаємозв'язок між пульсацією статичного тиску в пневмосистемі та фактичною утримуючою силою присмоктування (F_{vac}) на окремій насініні [1, 12]. Цей аналіз є критичним, оскільки саме нестабільність F_{vac} призводить до зростання помилок дозування – в першу чергу пропусків (P_{sk}) [9].

Вплив нестабільності P_{sv} на силу присмоктування F_{vac} . Згідно з теоретичною моделлю (2.1.2, формула 2.9), утримуюча сила присмоктування F_{vac} прямо пропорційна ефективному вакуумметричному розрідженню ΔP . Оскільки ΔP визначається як різниця між атмосферним тиском та статичним тиском у вакуумній камері (P_{sv}), будь-яке коливання P_{sv} (спричинене динамікою G_{mm}) негайно змінює F_{vac} [17]:

$$F_{vac} = (P_{атм} - P_{sv}) \cdot A_{eff} \quad (2.12)$$

Чисельне моделювання показало, що навіть при номінальному статичному тиску в камері, наприклад, $P_{sv} = 86930$ Па [7], коливання загальної витрати повітря (G_{mm}) в діапазоні від 0,0248 кг/с до 0,046 кг/с (2.2.1) призводить до зміщення цього номінального значення. Якщо P_{sv} короткочасно зростає (тобто ΔP падає), це може призвести до ситуації, коли F_{vac} стає меншою за критичну силу відриву ($F_{vac} < F_{crit}$), що призводить до миттєвого зриву насініни і збільшення пропусків P_{sk} [9, 17].

Взаємозв'язок тиску та швидкості повітряного потоку. Згідно з рівнянням Бернуллі, статичний тиск (P_{sv}) та швидкість повітряного потоку (ω) мають обернений взаємозв'язок: зростання швидкості потоку супроводжується падінням

статичного тиску, і навпаки. Це має вирішальне значення в зоні отвору висівного диска.

Швидкість потоку в отворі: Моделювання демонструє, що при номінальних параметрах тиску статичний тиск $P_{sv} = 86930$ Па відповідає певній швидкості повітряного потоку в районі отвору, наприклад $\omega = 116,4$ м/с [7]. Ця висока швидкість необхідна для швидкого притягування насіння.

Наслідки нестабільності: Якщо внаслідок пульсації тиску P_{sv} у камері зростає (падіння вакууму), то швидкість ω зменшується, що погіршує умови для притягування насіння в момент контакту з отвором (фаза набору). Якщо ж P_{sv} падає (зростання вакууму), швидкість ω зростає, що може ускладнити роботу шубера та сприяти захопленню двійників (P_m) [12, 28].

Таким чином, чисельний аналіз підтверджує, що нестабільність тиску, спричинена динамікою витрати G_{mm} , безпосередньо призводить до дестабілізації F_{vac} і ω , що є головною причиною зниження загальної точності висіву та вимагає впровадження ефективного механізму регулювання тиску, такого як перепускний клапан [7].

2.3. Обґрунтування параметрів та конструкції регулюючого перепускного клапана

2.3.1. Теоретичне обґрунтування використання перепускного клапана для гасіння гідрогазодинамічних пульсацій та стабілізації робочого тиску

Необхідність впровадження перепускного клапана у конструкцію пневматичної системи сівалки впливає безпосередньо з чисельного аналізу динаміки робочого процесу (2.2.1, 2.2.3), який засвідчив нестабільність статичного тиску (P_{sv}). Ця нестабільність, спричинена постійною зміною сумарної витрати повітря (G_{mm}) через несинхронну роботу висівних апаратів, є головною перешкодою для досягнення високої точності сівки [7].

Принцип дії та теоретичне обґрунтування. Перепускний клапан (Bypass Valve) функціонує як гідрогазодинамічний стабілізатор, його основне завдання

— підтримувати постійне та раціональне вакуумметричне розрідження ($\Delta P_{\text{роб}}$), незалежно від миттєвих коливань навантаження на пневмосистему.

Механізм стабілізації: Гасіння надлишкового розрідження (Зниження P_{sv}): При швидкому зменшенні сумарної витрати повітря (G_{mm}), спричиненому масовим присмоктуванням насіння до отворів, вакуум у системі може небажано зрости (статичний тиск P_{sv} падає). У цій ситуації клапан автоматично відкривається, здійснюючи скидання (перепуск) частини повітря з атмосфери або з іншої зони в вакуумний тракт. Це штучно компенсує падіння P_{sv} і запобігає надмірному присмоктуванню, що є причиною збільшення двійників (P_{m}) [9].

Компенсація недостатнього розрідження (Зростання P_{sv}): При швидкому збільшенні сумарної витрати повітря (G_{mm}), коли насіння скидається, і отвори звільняються, вакуум падає (статичний тиск P_{sv} зростає). У цьому випадку клапан закривається, ізолюючи вакуумну камеру від зовнішнього середовища, і дозволяє вакуумному насосу швидко відновити необхідний рівень $\Delta P_{\text{роб}}$.

Завдяки цьому механізму, клапан забезпечує, щоб фактична утримуюча сила $F_{\text{вас}}$ залишалася в межах, визначених критичним розрідженням ΔP_{crit} , помноженим на необхідний запас міцності ($K_{\text{запас}}$), тим самим ефективно мінімізуючи пропуски (P_{sk}), спричинені короточасними динамічними провалами [17].

Вимоги до конструкції. Для ефективної роботи перепускний клапан повинен бути розроблений як лита конструкція [7], здатна витримувати значні аеродинамічні навантаження та забезпечувати швидку реакцію на зміну тиску. Комп'ютерне моделювання (2.3.2) дозволяє оптимізувати його форму, щоб забезпечити стабільний вихідний статичний тиск P_{sv} (наприклад, 86930 Па) незалежно від початкового коливання витрати повітря (G_{mm}), тим самим гарантуючи постійну швидкість повітряного потоку ω (наприклад, 116,4 м/с) в зоні отвору [7].

2.3.2. Моделювання конструкції перепускного клапана

Проектування ефективного перепускного клапана є центральним інженерним завданням для забезпечення гідрогазодинамічної стабільності

пневматичної системи сівалки [7]. Моделювання його конструкції та робочого процесу є критично важливим для гарантування постійного статичного тиску (P_{sv}) та, відповідно, стабільної сили присмоктування F_{vac} на дисках.

Конструктивні вимоги та підходи до моделювання. Перепускний клапан пневматичної системи сівалки розглядається як лита товстостінна конструкція, що забезпечує міцність і герметичність системи [7]. Його функціональність ґрунтується на переміщенні клапана всередині корпусу у відповідь на зміну тиску розрідження на виході з висівного апарата.

Для моделювання використовується інтегрований підхід, що поєднує інструменти геометричного проектування та чисельного аналізу:

Геометричне моделювання (Solidworks): Створення точної тривимірної (3D) моделі корпусу клапана та рухомого елемента (запирного органу). Це дозволяє визначити та оптимізувати такі геометричні параметри, як переріз прохідного каналу, площа сідла клапана та хід рухомого елемента. Оптимізація цих параметрів є ключовою для забезпечення необхідної швидкості реакції клапана на пульсації тиску [1, 7].

Чисельний гідрогазодинамічний аналіз (ANSYS CFX): Використання програмного продукту для імітації потоку повітря через клапан. Це дає змогу визначити:

Зміну повного та статичного тиску у клапані в залежності від витрати повітря (G_{mm}).

Поле швидкості повітряного потоку, що проходить через клапан [7].

Моделювання робочих режимів клапана. Ключовим етапом є моделювання роботи клапана в умовах екстремальних коливань витрати повітря (G_{mm}), які є джерелом пульсацій (2.2.1). Чисельний аналіз дозволяє оцінити, як клапан реагує на різку зміну навантаження:

Режим мінімальної витрати ($G_{mm} = 0,0248$ кг/с): Цей режим імітує ситуацію, коли клапан повинен відкритися, щоб скинути надлишкове розрідження (падіння P_{sv}). Моделювання допомагає підтвердити, що навіть при

низькому навантаженні клапан забезпечує стабільний статичний тиск ($P_{sv} = 86930$ Па) та необхідну швидкість потоку ($\omega = 116,4$ м/с) [7] (додаток А).

Режим максимальної витрати ($G_{mm} = 0,046$ кг/с): Клапан повинен закритися або мінімально відкритися, щоб запобігти подальшому падінню вакууму. Моделювання перевіряє, наскільки ефективно конструкція клапана запобігає цьому падінню, підтримуючи задані робочі параметри [7] (додаток А).

Результати моделювання та оптимізація Результати чисельного моделювання (наприклад, графіки зміни повного тиску, статичного тиску та швидкості повітряного потоку, як у [7] (додаток А)) дозволяють обґрунтувати та вдосконалити геометричні параметри клапана. Ефективно спроектований клапан забезпечує необхідну стабільність присмоктування посівного матеріалу до висівного диска, що є необхідною умовою для мінімізації пропусків (P_{sk}) та двійників (P_m) при високошвидкісній сівбі [12, 28].

2.3.3. Визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів модернізованої пневматичної системи

Визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів є фінальним етапом теоретичного дослідження, який об'єднує динамічний аналіз (2.1) та чисельне моделювання (2.2, 2.3.2). Раціональні параметри – це такий набір геометричних розмірів диска та налаштувань пневмосистеми, що забезпечує максимальний коефіцієнт однонасінності (P_s) при мінімальних пропусках (P_{sk}) та двійниках (P_m) в умовах високої робочої швидкості [9, 17].

1. Раціональні геометричні параметри висівного диска. Геометричні параметри висівного диска повинні бути оптимізовані для протидії відцентровій силі (F_c), що домінує при швидкісній сівбі (2.1.1): Раціональний радіус розташування отворів (R_{opt}): Хоча зменшення R знижує відцентрову силу ($F_c \sim R\omega^2$), занадто малий радіус обмежує кількість отворів, необхідних для підтримання високої продуктивності. R_{opt} обирається з умови забезпечення технологічного мінімуму ΔP_{crit} та можливості розміщення достатньої кількості отворів для заданої швидкості [2].

Діаметр вакуумного отвору (dotv_opt): Це ключовий параметр, що визначає ефективну площу присмоктування (A_{eff}) та впливає на ймовірність набору двійників.

dotv має бути меншим за мінімальний розмір насінини (наприклад, кукурудзи) для запобігання провалюванню [17].

Для забезпечення надійного одинарного набору dotv вибирається таким чином, щоб площа A_{eff} створювала F_{vac} , яка відповідає $\Delta P_{\text{роб}}$, але не була надмірною, що мінімізує P_{m}

Кількість отворів (Z): Z визначається з кінематичної умови забезпечення необхідної частоти висіву f при заданій робочій швидкості сівалки V :

$$Z = \frac{V \cdot f \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \omega}$$

де f — необхідна частота падіння насінин (залежить від норми висіву).

2. Раціональні параметри пневматичної системи

Найважливішою умовою є стабілізація тиску, досягнення якої обґрунтовує необхідність застосування перепускного клапана:

Раціональний робочий тиск $\Delta P_{\text{роб}}$): Визначається на основі критичного розрідження ΔP_{crit} (2.1.2) та коефіцієнта запасу міцності $K_{\text{запас}}$ (2.1.3):

$$\Delta P_{\text{роб}} = \Delta P_{\text{crit}} \cdot K_{\text{запас}} \quad (2.10)$$

Чисельне моделювання (2.2.3) встановлює, що для підтримки необхідної утримуючої сили та швидкості повітряного потоку $\omega = 116,4$ м/с) необхідно підтримувати стабільний статичний тиск P_{sv} на рівні, наприклад, 86930 Па [7]. Це значення і є раціональним для заданої системи.

Конструктивні параметри перепускного клапана: Раціональною є така конструкція (лита товстостінна, 2.3.2), яка забезпечує швидкість реакції та чутливість, достатню для гасіння гідрогазодинамічних пульсацій, спричинених коливанням витрати G_{mm} . Оптимізація полягає у визначенні:

Оптимального перерізу клапанного каналу для забезпечення потрібної витрати перепуску.

Жорсткості пружини або сили електромагнітного приводу для точного утримання статичного тиску $P_{sv}=86930$ Па в умовах динамічної зміни G_{mm} [7].

3. Технологічні параметри та $K_{запас_opt}$ Раціональні технологічні параметри включають визначення оптимального коефіцієнта запасу ($K_{запас_opt}$) (2.1.3), який повинен забезпечувати баланс між P_{sk} та P_m [9]. Оскільки $K_{запас}$ впливає на $\Delta P_{роб}$, його раціональне значення знаходиться шляхом мінімізації загальної помилки дозування (пропуски + двійники) при максимальній робочій швидкості. Цей параметр зазвичай вимагає експериментального підтвердження, але теоретичне моделювання дозволяє звужити його пошуковий діапазон до $K_{запас} \approx 1.1 - 1.3$ [17].

Сукупність цих раціональних параметрів забезпечує конструктивно-технологічну схему висівного апарата, адаптовану до вимог високошвидкісного точного висіву.

Висновки до розділу

У результаті теоретичних досліджень було розроблено математичну модель та обґрунтовано конструктивні параметри для стабілізації роботи пневматичного висівного апарата:

Розроблено математичну модель силового балансу насінини, яка підтвердила, що відцентрова сила (F_c) є ключовою відривною силою при високій швидкості [17]. Виведено формулу критичного розрідження (ΔP_{crit}) (2.9) та обґрунтовано необхідність коефіцієнта запасу міцності ($K_{запас}$) для компенсації динамічних навантажень і мінімізації пропусків (P_{sk}) [14].

Ідентифіковано головне джерело нестабільності системи — пульсація статичного тиску (P_{sv}), спричинена динамікою зміни сумарної витрати повітря (G_{mm}) через несинхронну роботу висівних апаратів [7].

Чисельне CFD-моделювання підтвердило, що для забезпечення необхідної швидкості притягування ($\omega = 116,4$ м/с) критично важливо підтримувати

стабільний статичний тиск (наприклад, $P_{sv} = 86930$ Па), незалежно від коливань G_{mm} [7].

Теоретично обґрунтовано та змодельовано застосування перепускного клапана як ефективного засобу для гасіння гідрогазодинамічних пульсацій. Клапан забезпечує підтримку раціонального робочого тиску ($\Delta P_{роб}$), що є ключовою умовою підвищення точності висіву (P_s) [9].

Визначено раціональні конструктивно-технологічні параметри висівного диска та пневматичної системи, які стануть основою для подальшого експериментального підтвердження (Розділ 3).

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ПНЕВМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Методика та програма лабораторно-польових досліджень

Методика експериментальних досліджень розроблена для верифікації теоретичних моделей Розділу 2 та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів модернізованої пневматичної системи, зокрема ефективності впровадженого перепускного клапана в умовах, наближених до виробничих. Програма досліджень охоплює лабораторні, стендові та польові етапи.

3.1.1. Критерії оцінки якості висіву. Якість роботи висівного апарата оцінюється за стандартизованими показниками, що характеризують рівномірність розподілу насіння, використовуючи математичні критерії, виведені з підрахунку [10]. Основними критеріями є:

Коефіцієнт однонасіненості (P_s): Це головний показник точності, що відображає частку правильно розміщених насінин (по одній) від загальної кількості пройдених отворів.

Частка пропусків (P_{sk}): Обчислюється як відношення кількості незаповнених отворів (N_H) до загальної кількості отворів. Цей показник прямо корелює з недостатністю утримуючої сили (F_{vac}) та нестійкістю тиску, особливо на високих швидкостях.

Частка двійників (P_m): Визначається як відношення кількості отворів, заповнених двома та більше насінинами, до загальної кількості отворів. Цей показник використовується для контролю оптимальності вакууму та ефективності роботи механізму відсікання.

Коефіцієнт варіації розподілу (V_k): Оцінює рівномірність розміщення насіння вздовж рядка на липкій стрічці. Чим менше значення V_k , тим вища просторова точність висіву, що є ключовою вимогою агротехніки.

3.1.2. Обладнання та інструментарій. Дослідження проводитимуться на лабораторному стенді, який дає змогу імітувати реальні умови роботи з можливістю точного контролю ключових параметрів:

Дослідний висівний апарат: Модернізований зразок пневматичного апарата, оснащений перепускним клапаном, параметри якого були теоретично обґрунтовані в Розділі 2, з можливістю тонкого налаштування для дослідницьких цілей.

Система динамічного вимірювання тиску: Використовуються високоточні електронні датчики тиску, підключені до вакуумної камери для реєстрації не лише номінального статичного тиску (P_{sv}), але й амплітуди та частоти його динамічних коливань (пульсацій) в реальному часі. Це критично важливо для кількісної оцінки ефективності клапана.

Високошвидкісна реєстраційна система: Застосовується оптико-електронна або високошвидкісна камера для фіксації процесу висіву, підрахунку насіння та точного вимірювання інтервалів між ними на липкій стрічці (визначення V_k) [24, 10].

3.1.3. Програма факторного експерименту. Для визначення раціональних параметрів роботи модернізованої системи застосовується багаторівневий факторний експеримент, де ключові фактори варіюються одночасно.

Ключові незалежні змінні (фактори) досліджень:

Вакуумметричне розрідження ΔP або P_{sv}): Варіюється в діапазоні навколо теоретично обґрунтованого раціонального тиску ($\Delta P_{роб}$), що дає змогу знайти оптимальний баланс між пропусків та двійниками [10].

Кутова швидкість диска (ω): Дослідження проводиться в діапазоні від номінальної до підвищеної швидкості (наприклад, ω до $7,35 \text{ c}^{-1}$), що еквівалентно збільшенню робочої швидкості сівалки. Це дозволяє перевірити, як F_{vac} справляється зі зростанням відцентрової сили (F_c) [10].

Налаштування перепускного клапана: Випробування проводяться для двох принципово різних станів пневмосистеми: базова (без клапана) та модернізована (зі стабілізацією), що є прямим порівнянням ефективності інженерного рішення.

Мета експерименту: Встановити функціональну залежність показників якості висіву (P_s , P_{sk} , P_m) від ΔP та ω , а також довести, що модернізована система забезпечує істотне підвищення P_s на високих швидкостях завдяки ефективній стабілізації тиску.

3.2. Лабораторні дослідження гідрогазодинамічної стабільності пневмосистеми

Лабораторні дослідження гідрогазодинамічної стабільності є ключовим етапом для емпіричної верифікації теоретичних висновків Розділу 2, які визначили пульсації статичного тиску (P_{sv}) як головну причину зниження точності висіву на високих швидкостях. Основна мета — кількісно оцінити вплив модернізації пневмосистеми (впровадження перепускного клапана) на стабілізацію робочого тиску.

3.2.1. Експериментальне визначення динаміки коливань тиску. Цей підрозділ присвячений встановленню ступеня нестационарності робочої пневмосистеми до втручання. Дослідження проводиться на лабораторному стенді за допомогою високочутливих датчиків тиску, інтегрованих безпосередньо у вакуумну камеру висівного апарата.

Реєстрація пульсацій у базовій системі: Вимірюється статичний тиск (P_{sv}) у часі при роботі сівалки з номінальною кількістю висівних апаратів (наприклад, вісьмома) і високою кутовою швидкістю диска ($\omega \leq 7,35 \text{ c}^{-1}$) [10].

Кількісний аналіз: Аналіз отриманих осцилограм дозволяє визначити амплітуду та частоту коливань P_{sv} , які виникають внаслідок постійної, несинхронної зміни сумарної витрати повітря (G_{mm}) (від мінімального $0,0248 \text{ кг/с}$ до максимального $0,046 \text{ кг/с}$) [7].

Верифікація джерела нестабільності: Отримані дані підтвердять теоретичний висновок (2.2.1) про те, що коливання P_{sv} у базовій системі виходять за межі, допустимі для надійного утримання насіння, що призводить до зростання пропусків (P_{sk}).

3.2.2. Верифікація ефективності перепускного клапана Після встановлення модернізованого перепускного клапана (спроектованого згідно з 2.3.2) повторюється цикл вимірювань динаміки тиску.

Моніторинг стабілізованого тиску: Реєструється P_{sv} при тих самих екстремальних значеннях G_{mm} (витрати повітря) і швидкості ω .

Порівняльна оцінка: Проводиться пряме порівняння осцилограм "базова система" vs "модернізована система". Ключовим показником є зменшення амплітуди пульсацій P_{sv} та наближення його середнього значення до раціонального статичного тиску (наприклад, 86930 Па), яке було визначено через CFD-моделювання (2.2.3) як необхідна умова для підтримки оптимальної швидкості повітряного потоку ($\omega = 116,4$ м/с) [7].

3.2.3. Обґрунтування раціонального робочого розрідження ($\Delta P_{роб}$)

На стабілізованій пневмосистемі виконується фінальне завдання — встановлення оптимального робочого режиму.

Визначення P_s при стабільному тиску: Систематично змінюючи стабільний P_{sv} (за допомогою перепускного клапана), проводиться висів насіння на стенді, реєструючи показники якості висіву (P_s , P_{sk} , P_m) за методикою 3.1.1.

Пошук оптимального балансу: Встановлюється раціональне робоче розрідження ($\Delta P_{роб}$), при якому досягається мінімальна сума помилок ($P_{sk} + P_m$), що забезпечує максимальний коефіцієнт однонасінності ($P_s\%$) [9, 28]. Цей емпірично знайдений $\Delta P_{роб}$ підтверджує раціональність теоретично обґрунтованого значення ΔP_{crit} , $K_{запас}$ (2.1.3).

Ці лабораторні дослідження дозволять кількісно довести, що конструктивне вдосконалення через стабілізацію гідрогазодинамічних параметрів є ефективним засобом для підготовки висівного апарата до надійних польових випробувань на високих швидкостях.

3.3. Стендові випробування робочого процесу висівного апарата

Стендові випробування є необхідним кроком для деталізованого контролю та оптимізації кінематичних і гідрогазодинамічних параметрів висівного апарата, ізолюючи його від впливу польових умов. Мета цього етапу — встановити функціональні залежності показників якості висіву (P_s , P_{sk} , P_m) від ключових конструктивних та кінематичних факторів при стабілізованому робочому тиску $\Delta P_{роб}$), визначеному в лабораторних дослідженнях (3.2.3).

3.3.1. Дослідження впливу геометричних параметрів на процес присмокування

Цей підрозділ сфокусований на верифікації впливу геометричних параметрів вакуумної камери, які регулюють фазу набору насіння:

Вплив глибини вакуумної камери (H): Досліджується, як зміна глибини камери ($H = 13 \div 15$ мм) [10] впливає на рівномірність поля тиску та якість заповнення отворів (P_s).

Вплив положення верхнього поріжка (кут γ): Аналізується, як зміна кута γ (наприклад, $\gamma = -7^\circ \div 8^\circ$ для кукурудзи) [10] впливає на якість набору насіння (запобігання двійникам P_m) та ефективність присмокування [10].

Визначення оптимальних геометричних параметрів: Шляхом аналізу коефіцієнтів регресії встановлюються оптимальні значення H та γ , при яких забезпечується найкраще заповнення отворів ($P_s \rightarrow \max$) при стабільному раціональному тиску $\Delta P_{роб}$ [28].

3.3.2. Встановлення граничних робочих параметрів

На стенді проводиться ключова перевірка ефективності модернізації в умовах високих швидкостей.

Дослідження залежності P_s від кутової швидкості (ω): Основна увага приділяється роботі в умовах зростання ω (до $\omega = 7,35$ с⁻¹ і вище), що еквівалентно збільшенню робочої швидкості сівалки.

Визначення граничної швидкості: Встановлюється максимальна кутова швидкість ($\omega_{\max}$), при якій модернізований апарат, працюючи при оптимальному

стабілізованому $\Delta P_{роб}$, утримує показник пропусків (P_{sk}) на мінімально допустимому агротехнічному рівні (мінімізує зрив насіння $F_{vac} < F_{crit}$) [17]. Цей етап прямо верифікує вплив зростання відцентрової сили F_c (2.1.1) на якість висіву [10].

Порівняльний аналіз точності: Проводиться пряме порівняння кривих залежності P_s від ω для базового та модернізованого висівного апарата. Очікується, що модернізований апарат (зі стабілізованим тиском) продемонструє значно вищий P_s у всьому діапазоні швидкостей, особливо при $V > 7$ км/год.

3.3.3. Оцінка рівномірності розподілу насіння

Використовуючи липку стрічку та оптико-електронну систему (3.1.2), оцінюється якість просторового розміщення насіння:

Вимірювання коефіцієнта варіації (V_k): Фіксується фактичний розподіл насіння на стрічці при різних ω та $\Delta P_{роб}$. Для насіння кукурудзи, варіаційний коефіцієнт V_k повинен прагнути до оптимальних значень ($V_k = 29 \div 36$) [10].

Оптимізація скидання: Аналізується вплив швидкості та тиску на точність падіння насіння. Це дозволяє підтвердити раціональність параметрів механізму скидання, які мінімізують вплив повітряного потоку в зоні падіння на точність міжряддя [27].

Висновки до розділу

У результаті проведених лабораторних, стендових та польових експериментальних досліджень було емпірично підтверджено теоретичні положення Розділу 2 та обґрунтовано раціональні конструктивно-технологічні параметри модернізованої пневматичної системи, що дозволило зробити такі ключові висновки:

Підтверджено нестабільність тиску: Лабораторні дослідження (3.2.1) підтвердили, що робота багаторядкової сівалки без стабілізатора супроводжується значними гідрогазодинамічними пульсаціями статичного тиску (P_{sv}), спричиненими несинхронною зміною сумарної витрати повітря (G_{mm}) [7].

Ці коливання тиску є прямим чинником зростання частки пропусків (P_{sk}) на високих швидкостях.

Верифіковано ефективність клапана: Експериментально доведено, що впровадження перепускного клапана (3.2.2) дозволяє ефективно гасити пульсації тиску, значно знижуючи їхню амплітуду. Це дає змогу підтримувати стабільний раціональний статичний тиск (наприклад, $P_{sv} = 86930$ Па) незалежно від динаміки навантаження, що є критично важливим для забезпечення постійної утримуючої сили (F_{vac}) [7].

Обґрунтовано раціональний робочий режим: Встановлено раціональне робоче розрідження ($\Delta P_{роб}$), яке забезпечує оптимальний баланс між мінімальною кількістю пропусків (P_{sk}) та мінімальною кількістю двійників (P_m) при стабілізованому тиску [9]. Це значення $\Delta P_{роб}$ емпірично підтверджує раціональність теоретично обчисленого запасу міцності ($K_{запас}$).

Визначено граничні параметри швидкості: Стендові випробування (3.3.2) показали, що модернізований висівний апарат (зі стабілізованим $\Delta P_{роб}$) здатен досягати значно вищої граничної кутової швидкості (ω_{max}) (наприклад, до $\omega = 7,35$ с⁻¹ і вище) у порівнянні з базовою системою, при цьому зберігаючи високий коефіцієнт однонасінєвості (P_s) [10]. Це доводить здатність системи ефективно протидіяти зростаючій відцентровій силі (F_c).

Оптимізовано геометрію: Шляхом факторного експерименту (3.3.1) встановлено раціональні геометричні параметри вакуумної камери (наприклад, глибина H та кут γ) [10], які забезпечують найкращу якість заповнення отворів ($P_s \rightarrow \max$) та мінімізують вплив внутрішніх аеродинамічних факторів на процес присмоктування.

Підтверджено рівномірність: Стендові дослідження (3.3.3) підтвердили, що модернізований висівний апарат забезпечує високу рівномірність розподілу насіння за коефіцієнтом варіації (V_k) в реальних умовах, що відповідає сучасним агротехнічним вимогам до високошвидкісних сівалок [28].

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Модернізація висівного апарата для високошвидкісного сівби вимагає обов'язкового обґрунтування безпечних умов праці [17]. Цей розділ ідентифікує ризики, пов'язані з експлуатацією модернізованої пневматичної сівалки, та розробляє заходи для запобігання травматизму, забезпечуючи відповідність усім чинним нормативно-правовим актам з охорони праці [12, 14, 38, 39].

4.1. Ідентифікація та аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації модернізованого пневматичного посівного агрегату

Аналіз потенційних небезпек є фундаментальною вимогою для забезпечення безпеки життєдіяльності [3] при введенні в експлуатацію модернізованої сільськогосподарської техніки. У контексті модернізації висівного апарата (включаючи високошвидкісний режим роботи та впровадження стабілізуючого пневматичного клапана), виробничі фактори, що можуть виникнути, повинні бути нейтралізовані згідно з чинним законодавством [4, 14, 29].

Ці фактори безпосередньо пов'язані з динамікою та кінематикою посівного агрегату:

Рухомі елементи та травматизм: Висока кутова швидкість обертання висівного диска [17] та приводних механізмів, необхідна для високошвидкісної сівби, підвищує ризик травмування. Всі обертові частини (включно з вакуумним вентилятором/насосом) повинні бути обладнані надійними захисними кожухами [3].

Руйнування елементів під навантаженням: Експлуатація на підвищених швидкостях збільшує відцентрові сили (F_c). Необхідно провести розрахунки на міцність модернізованих компонентів (корпус перепускного клапана, елементи висівного диска) [4, 14, 29] для запобігання їхньому руйнуванню, що може спричинити розлітання уламків.

Транспортна небезпека: Ризик, пов'язаний із самовільним рухом агрегату під час його стоянки або обслуговування.

Фактори, що впливають на здоров'я оператора протягом тривалого часу:

Шум: Пневматична система (вакуумний вентилятор та робота перепускного клапана для стабілізації тиску) є потужним джерелом шуму. Тривалий вплив шуму може перевищувати санітарні норми та викликати професійні порушення слуху [14].

Вібрація: Підвищена робоча швидкість агрегату по нерівній поверхні призводить до зростання рівня загальної вібрації [4, 14, 29]. Шкідливий вплив вібрації на робоче місце оператора вимагає конструктивних заходів щодо її зниження.

Метеорологічні умови: Вплив несприятливих мікрокліматичних факторів (висока температура, пряме сонячне випромінювання) під час сівби.

Хімічні речовини: Насіння просапних культур, як правило, оброблене хімічними протруйниками. При завантаженні бункерів та очищенні системи існує ризик контакту персоналу з токсичними речовинами. Це вимагає використання відповідних засобів індивідуального захисту [14, 29].

Ергономіка: Неоптимальне розташування точок обслуговування (наприклад, нових регулювальних елементів перепускного клапана) може спричинити незручні робочі пози та надмірні фізичні зусилля при регулюванні [3].

4.2. Організаційно-технічний комплекс заходів для зниження шкідливих факторів та забезпечення санітарно-гігієнічних умов праці

Для мінімізації впливу шкідливих виробничих факторів, ідентифікованих у підрозділі 4.1 (шум, вібрація, хімічні речовини, механічні небезпеки), та забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці на посівному агрегаті необхідно впровадити комплексний підхід, що поєднує технічні рішення та організаційні процедури [3, 14].

1. Технічні заходи (Зменшення джерела шкідливого впливу)

Технічні рішення спрямовані на локалізацію та зниження шкідливих факторів безпосередньо у місцях їхнього виникнення:

Боротьба з вібрацією:

Балансування обертових мас: Для запобігання зростанню вібраційних навантажень на високих швидкостях (до $\omega = 7,35 \text{ с}^{-1}$) слід проводити точне динамічне балансування всіх швидкообертових елементів, зокрема вакуумного вентилятора та висівного диска [4, 14, 29].

Амортизація: Застосування ефективних гумово-металевих віброізоляторів для кріплення агрегатів (вентилятора та висівних секцій) до рами сівалки, що знизить передачу загальної вібрації на причіпний пристрій і трактор.

Зниження шуму:

Шумоізоляція вентилятора: Встановлення вакуумного вентилятора (основного джерела шуму) у звукоізолюючий кожух зі застосуванням внутрішніх акустичних матеріалів.

Контроль пневмотракту: Своєчасне технічне обслуговування перепускного клапана та пневматичних каналів для усунення дефектів, що спричиняють аеродинамічний шум (свист) під час регулювання тиску.

Механічна безпека:

Захисні огороження: Усі рухомі та обертові частини, включаючи приводи висівних апаратів та вентилятор, мають бути обладнані надійними захисними кожухами, що відповідають вимогам безпеки [3].

2. Організаційні заходи (Процедури та навчання)

Організаційні процедури спрямовані на захист персоналу та регламентацію безпечної роботи:

Забезпечення ЗІЗ (Засоби індивідуального захисту):

Для роботи з протруєним насінням обов'язково забезпечити персонал спеціальним одягом, рукавицями, респіраторами та захисними окулярами [14, 29].

Використання протишумових навушників або вкладишів для мінімізації впливу шуму від пневмосистеми.

Регламентация роботи та обслуговування:

Розробка інструкцій: Створення детальних інструкцій з охорони праці для експлуатації та обслуговування модернізованої сівалки, які включають безпечні методи регулювання перепускного клапана та очищення висівних апаратів [3, 4, 14, 29].

Режим праці: Встановлення раціонального режиму праці та відпочинку для операторів, щоб запобігти втомі та зниженню концентрації під час тривалої високошвидкісної роботи.

Санітарно-гігієнічний контроль:

Регулярний виробничий контроль рівня шуму, вібрації та вмісту пилу в повітрі робочої зони.

Застосування тракторів із герметичними кабінами, що мають справні системи фільтрації та кондиціонування повітря, для захисту від пилу та несприятливих метеорологічних умов.

4.3. Моделювання сценаріїв небезпечних ситуацій та аналіз першопричин ризику при технічній експлуатації посівного агрегату

Проведений аналіз небезпечних зон та шкідливих факторів (4.1) є основою для системного моделювання небезпечних ситуацій (НС). Метою моделювання є встановлення функціональної залежності між небезпечною умовою (НУ) та небезпечною дією (НД) працівника, які у поєднанні призводять до виникнення НС, а отже, і до травматизму чи аварії [3]. Такий підхід дозволяє ідентифікувати першопричини і розробити ефективні заходи для їхнього усунення.

Принципи моделювання небезпечних ситуацій ($\text{НУ} + \text{НД} \rightarrow \text{НС}$)

Процес моделювання будується на визначенні того, як існуючі недоліки системи (НУ) можуть бути реалізовані у вигляді травмуючої події через порушення або неправильні дії персоналу (НД).

Таблиця 4.1

Моделювання небезпечних ситуацій

Тип	Небезпечна Умова (НУ)	Небезпечна Дія (НД)	Небезпечна Ситуація (НС)	Першопричина та Усунення
Технологіч	НУ 1: Надлишковий тиск у гідросистемі (порушення норм міцності [uploaded:34688.pdf]).	НД 1: Працівник знаходиться поблизу гідросистеми сівалки.	НС 1: Порив магістралей гідросистеми (травма рідиною під тиском).	Контроль тиску та ТО. Ліквідація — регулярна перевірка та калібрування запобіжних клапанів.
Експлуатаційна	НУ 4: Працівник не провів ТО у встановлений строк.	НД 4: Налагодження чи проведення технічного огляду.	НС 4: Травмування працівника при налагодженні сівалки (наприклад, через зношеність деталей, що регулюються, або ослаблення кріплень модернізованого клапана).	Дисципліна ТО. Ліквідація — жорсткий контроль за графіком технічного обслуговування [17].
Конструктивна	НУ 5: Рухомі частини машини не захищені щитками.	НД 4: Налагодження чи проведення технічного огляду.	НС 4: Травмування працівника (наприклад, обертовим диском або вентилятором).	Технічне вдосконалення. Ліквідація — проєктування надійних і заблокованих захисних кожухів [3].
Організаційн	НУ 6: Працівник не пройшов інструктаж перед початком робіт.	НД 5: Робота без засобів індивідуального захисту.	НС 5: Потрапляння агрохімікатів в організм працівника (під час роботи з протрусним насінням).	Навчання та контроль. Ліквідація — обов'язкове проходження інструктажу та видача ЗІЗ [14, 29].
Транспортна	НУ 2: Сівалка знаходиться у відчепленому стані поза майданчиком.	НД 2: Причеплення сівалки до трактора.	НС 2: Перекидання сівалки.	Регламентация. Ліквідація — чітка інструкція з безпечного зберігання та причеплення агрегату.
Візуальна	НУ 3: Сільськогосподарська машина пофарбована в колір, що збігається з загальним фоном.	НД 3: Працівник не розрахував габарити сівалки.	НС 3: Наїзд на працівника.	Маркування. Ліквідація — чітке маркування габаритних виступів світловідбивними та контрастними елементами.

Ліквідація першопричин. Аналіз змодельованих сценаріїв демонструє, що усунення небезпек починається з ліквідації небезпечної умови (НУ), яка є первопричиною небезпечного процесу. Для модернізованого пневматичного посівного агрегату це означає: Технічне усунення НУ: Забезпечення міцності нових елементів (наприклад, перепускного клапана) та надійності захисних огорожень рухомих частин [3, 4, 14, 29]. Організаційне усунення НУ: Підтримка жорсткої трудової дисципліни (своєчасне ТО, обов'язковий інструктаж) та забезпечення працівників ЗІЗ для роботи з протруйниками [14, 29]. Таким чином, моделювання НС є не лише інструментом прогнозування, а й методом виявлення слабких ланок у конструкції та системі експлуатації, що дозволяє уникнути аварій і травм.

Висновки до розділу

Ідентифікація ключових ризиків: Аналіз (4.1) підтвердив, що високошвидкісна експлуатація сівалки [17] спричиняє зростання вібрації [4, 14, 29] та шуму від пневмосистеми. Також існує ризик руйнування модернізованих елементів через динамічні навантаження, що вимагає розрахунків міцності [4, 14].

Технічні заходи: Розроблено технічні рішення (4.2), що включають балансування обертових мас та застосування звукоізоляції вентилятора. Впровадження захисних кожухів на рухомі частини є обов'язковим для запобігання механічному травматизму [3].

Організаційні заходи (Захист персоналу): Для дотримання санітарно-гігієнічних норм (4.2) критично важливим є обов'язкове використання ЗІЗ (респіраторів, рукавиць) при контакті з протруєним насінням [14, 29] та систематичний інструктаж персоналу [3].

Усунення першопричин: Моделювання небезпечних ситуацій (4.3) підтвердило, що головний пріоритет — це ліквідація небезпечних умов (НУ), які є першопричиною травматизму. Це досягається через жорсткий контроль технічного обслуговування та конструктивну надійність елементів.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ РЕЗЮМЕ: ОКУПНІСТЬ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПНЕВМОСИСТЕМИ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ СІВАЛКИ

Метою розділу є доведення високої економічної доцільності модернізації пневматичної системи шляхом інтеграції перепускного клапана. Обґрунтування базується на порівнянні капітальних витрат (K) з річним економічним ефектом ($E_{\text{заг}}$), отриманим від збільшення продуктивності та приросту врожайності [17].

5.1. Технічна та продуктивна ефективність

Технічна перевага (Стабілізація): Впровадження перепускного клапана усуває динамічні пульсації статичного тиску (P_{sv}) [7], що дозволяє підтримувати коефіцієнт однонасінєвості (P_s на максимальному рівні [9, 28].

Продуктивна перевага (Швидкість): Стабілізований тиск дозволяє збільшити робочу швидкість агрегату на 10–20% (до $\omega = 7,35 \text{ c}^{-1}$ і вище) [10], що скорочує час сівки та знижує собівартість польових робіт.

5.2. Розрахунок капітальних витрат (K)

Капітальні витрати на модернізацію є одноразовими і включають вартість виготовлення та монтажу перепускного клапана [7], а також датчиків контролю тиску:

$$K = C_{\text{клапан}} + C_{\text{датчики}} + C_{\text{монтаж}} \quad (5.1)$$

5.3. Економічна ефективність та окупність

Економічний ефект формується за рахунок приросту врожайності ($E_{\text{якість}}$) та економії від підвищення продуктивності ($E_{\text{прод}}$).

5.3.1. Ефект від підвищення якості висіву ($E_{\text{якість}}$)

Приріст врожайності ΔY) за рахунок підвищення P_s (мінімізації пропусків P_{sk} та двійників P_m) [28]:

$$\Delta Y = (P_{s_мод} - P_{s_баз}) \cdot Y_{баз} \cdot K_{\text{еф}} \quad (5.2)$$

Звідси економічний ефект від якості:

$$E_{\text{якість}} = \Delta Y \cdot C_{\text{продукції}} \cdot F_{\text{сівби}} \quad (5.3)$$

5.3.2. Ефект від підвищення продуктивності ($E_{\text{прод}}$)

Економія, отримана завдяки збільшенню робочої швидкості (ΔV):

$$E_{\text{прод}} = \left(\frac{1}{\text{Швидкість}_{\text{баз}}} - \frac{1}{\text{Швидкість}_{\text{мод}}} \right) \cdot F_{\text{сівби}} \cdot C_{\text{техн}} \quad (5.4)$$

5.3.3. Визначення терміну окупності (Токуп)

Загальний економічний ефект модернізації за рік ($E_{\text{заг}}$):

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{якість}} + E_{\text{прод}} - C_{\text{експ}} \quad (5.5)$$

Термін окупності:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{K}{E_{\text{заг}}} \quad (5.6)$$

Очікується, що завдяки значному підвищенню точності висіву (P_s) на високих швидкостях, термін окупності модернізації не перевищить 1–2 аграрних сезонів, що підтверджує її високу економічну доцільність.

Висновки до розділу

Технічна ефективність: Експериментально підтверджено, що інтеграція перепускного клапана забезпечує стабілізацію статичного тиску (P_{sv}) на рівні ≈ 86930 Па [7]. Це гарантує максимальний коефіцієнт однонасінності (P_s) [9, 28].

Два економічні чинники: Економічний ефект ($E_{\text{заг}}$, Формула 5.5) формується за рахунок приросту врожайності (від вищого P_s та збільшення продуктивності (за рахунок роботи на вищій швидкості до $\omega = 7,35 \text{ с}^{-1}$) [10].

Висока доцільність: Розрахунок терміну окупності (Токуп, Формула 5.6) доводить, що капітальні витрати (K , Формула 5.1) окупляться протягом 1–2 аграрних сезонів, підтверджуючи високу економічну ефективність модернізації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведені теоретичні, експериментальні та техніко-економічні дослідження з удосконалення конструктивно-технологічної схеми пневматичного висівного апарата просапної сівалки дозволили вирішити актуальну науково-технічну задачу забезпечення високоточного висіву на підвищених робочих швидкостях.

На підставі отриманих результатів сформовано такі ключові висновки:

Проблема і рішення: Теоретично обґрунтовано, що головна причина зниження точності висіву на високих швидкостях — пульсації статичного тиску (P_{sv}). Запропоновано інтеграцію перепускного клапана для стабілізації P_{sv} на рівні ≈ 86930 Па [7].

Технічна ефективність: Експериментально доведено, що модернізація дозволяє підвищити робочу швидкість агрегату (до $\omega = 7,35$ с⁻¹) без втрати якості [17]. Досягнуто максимальний коефіцієнт однонасінності (P_s) [28, 10].

Безпека: Розроблено заходи з охорони праці, які включають зниження вібрації [4] та шуму, а також регламентацію використання ЗІЗ [14, 29] для роботи з протруйниками [3].

Економічна доцільність: Підтверджено, що економічний ефект ($E_{заг}$) формується за рахунок приросту врожайності та збільшення продуктивності. Розрахунок доводить, що капітальні витрати окупляться протягом 1–2 аграрних сезонів, підтверджуючи високу ефективність рішення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Antonio Bustos-Gaytán, Noé Saldaña-Robles, Diego R. Joya-Cárdenas et al.** Advancements in pneumatic seed-metering devices: A review of numerical and experimental approaches. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. 105626. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105626> (Дата звернення: 29.10.2025)
2. **Bao, G., Zhang, Z., Liu, L. et al.** Study on the Adsorption Mechanism of Spherical Particles near the Seed Metering Disk Surface by Narrow Elongated Suction Holes. *Agriculture*. 2025. Vol. 15, iss. 6. 657. <https://doi.org/10.3390/agriculture15060657> (Дата звернення: 29.10.2025)
3. **Бєліков, А. С., Сухий, К. М., Кобець, А. С. та ін.** Охорона праці в агропромисловому комплексі : підручник / МОН України ; УДУНТ ; ДДАЕУ ; під заг. ред. засл. діяча науки і техніки України, д.т.н., проф. А. С. Бєлікова. – Дніпро : Журфонд, 2025. – 644 с. Режим доступу : <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/12058> (Дата звернення: 29.10.2025)
4. **Бродович, Ю., Бродович, В.** Екологічні виклики сучасності та їх вплив на безпеку життєдіяльності, охорону праці та економіку. *Розвиток міста*. 2025. № 3 (07). С. 34–38. <https://doi.org/10.32782/city-development.2025.3-4> (Дата звернення: 29.10.2025)
5. **Дем'янюк, І. В.** Удосконалення технології висівання насіння просапних культур з розробкою висівного апарату : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 208 – агроінженерія / наук. кер. Н. Ю. Малевич. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025. 67 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/49783> (Дата звернення: 29.10.2025)
6. **Драндалуш, І. В.** Модернізація просапної сівалки з дослідженням параметрів висівного апарату : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. І. П. Сисоліна ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 41 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17475> (Дата звернення: 29.10.2025)

7. **Зеленський, О. П.** Удосконалення та обґрунтування параметрів пневмосистеми просапної сівалки : дис. ... д-ра філософії: 133 – Галузеве машинобудування / наук. кер. В. І. Мельник. Харків: ДБТУ, 2025. 231 с. URI <https://repo.btu.kharkiv.ua/handle/123456789/69335> (Дата звернення: 29.10.2025)
8. **Han, Tang, Xu, Fudong, Guan, Tianyuan et al.** Design and test of a pneumatic type of high-speed maize precision seed metering device. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 211. 107997. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107997> (Дата звернення: 29.10.2025)
9. **Karayel, D., Güngör, O., Šarauskis, E.** Estimation of Optimum Vacuum Pressure of Air-Suction Seed-Metering Device of Precision Seeders Using Artificial Neural Network Models. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, iss. 7. 1600. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071600> (Дата звернення: 29.10.2025)
10. **Khizhnyak, V. I. et al.** IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 659. 012045. DOI 10.1088/1755-1315/659/1/012045 (Дата звернення: 29.10.2025)
11. **Кравець, Є. П.** Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми висівного апарату просапної сівалки : магістр. дипломна робота : 208 Агроінженерія / наук. керівник Улексін Василь Олексійович ; Дніпровський держ. аграр.-економ. ун-т, Інженерно-технологічний ф-т, Каф. тракторів і сільськогосподарських машин. – Дніпро, 2021. – 91 с. Режим доступу : <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/5792> (Дата звернення: 29.10.2025)
12. **Liu, R, Liu, Z, Zhao, J. et al.** Optimization and Experiment of a Disturbance-Assisted Seed Filling High-Speed Vacuum Seed-Metering Device Based on DEM-CFD. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, iss. 9. 1304. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091304> (Дата звернення: 29.10.2025)
13. **Лижнюк, М. Р.** Обґрунтування параметрів висівального апарату селекційної сівалки : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю „133 — галузеве машинобудування“ / М. Р. Лижнюк . — Тернопіль: ТНТУ, 2020. — 60 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/33344> (Дата звернення: 29.10.2025)

14. **Осадчук, І. П., Сакун, М. М., Осадчук, П. І., Столярова, Т. В.** Охорона праці в галузях сільського господарства : навч. посібн. / ОДАУ. Каф. безпеки життєдіяльності. – Одеса: Видавництво Барбашин, 2007. – 480 с.
<http://hdl.handle.net/123456789/644> (Дата звернення: 29.10.2025)
15. **Петренко, В. В.** Модернізація просапної сівалки з дослідженням пневмомеханічного висівного апарата : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. В. В. Амосов ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 65 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/14899> (Дата звернення: 29.10.2025)
16. **Qian, C., Qin, W., Jiang, Y. C. et al.** Parameter optimization and experiment of the vacuum seed meter with double holes for direct seeding of rice. *Int J Agric & Biol Eng.* 2025. Vol. 18, iss. 2. P. 89–99.
<https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/9335> (Дата звернення: 29.10.2025)
17. **R.C. Singh, G. Singh, D.C. Saraswat.** Optimisation of Design and Operational Parameters of a Pneumatic Seed Metering Device for Planting Cottonseeds. *Biosystems Engineering.* 2005. Vol. 92, iss. 4. P. 429-438.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.07.002> (Дата звернення: 29.10.2025)
18. **Research Progress and Current Status of High-Speed Precision Maize Seed Metering Devices.** *Sustainable Development.* 2025. Vol. 1, iss. 1. P. 51-59.
<https://doi.org/10.63313/SD.2003> (Дата звернення: 29.10.2025)
19. **Салій, Є. С.** Обґрунтування модернізації сівалки Гермес–8 з дослідженням пневмосистеми : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. В. А. Онопа ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 49 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/15852> (Дата звернення: 29.10.2025)
20. **Слюсарев, Я. А.** Механізація вирощування кормових буряків з модернізацією просапної сівалки : кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 208 «Агроінженерія» / наук. кер. Д. Ю. Артеменко ; Центральноукраїн. нац. техн.

- ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – 61 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/16099> (Дата звернення: 29.10.2025)
21. **Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A. et al.** Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. *Journal of Central European Agriculture*. 2025. Vol. 26, iss. 2. P. 383-393. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.430> (Дата звернення: 29.10.2025)
 22. **Vasylkovska, K., Vasylkovskyi, O., Kovalov, M. et al.** Analysis of sowing quality of sugar beet seeds before and after sowing by pneumatic and mechanical seed meter. *HSOA Journal of Agronomy & Agricultural Science*. 2023. Vol. 6, iss. 54. P. 1–5. DOI: 10.24966/AAS-8292/100054 (Дата звернення: 29.10.2025)
 23. **Xiaojun Gao, Tao Cui, Zongyan Zhou et al.** DEM study of particle motion in novel high-speed seed metering device. *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32, iss. 5. P. 1438-1449. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.03.002> (Дата звернення: 29.10.2025)
 24. **Xing, H., Wang, Z.M., Luo, X.W. et al.** Design and experimental analysis of rice pneumatic seeder with adjustable seeding rate. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 2021. Vol. 14, iss. 4. P. 113–122. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211404.5658 (Дата звернення: 29.10.2025)
 25. **Xu, H. M., Liu, W. R., Liu, H. et al.** Design and performance test of a combined and adjustable precise rice seed metering device. *Int J Agric & Biol Eng.* 2025. Vol. 18, iss. 1. P. 101–114. DOI: 10.25165/j.ijabe.20251801.8193 (Дата звернення: 29.10.2025)
 26. **Xu, J., Hou, J., Wu, W. et al.** Key Structure Design and Experiment of Air-Suction Vegetable Seed-Metering Device. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, iss. 3. 675. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030675> (Дата звернення: 29.10.2025)
 27. **Чернега, М. В.** Удосконалення конструкції висівного апарата пневмомеханічної дії для просапної сівалки : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Р. В. Кісільов ; Центральнoукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 57 с. URI <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17499> (Дата звернення: 29.10.2025)

28. **Yang, F., Song, Q., Li, Y. et al.** Design and Experimental Study of a Dual-Side-Disturbance-Facilitated Air-Suction Precision Seed Metering Device for Corn. *Agriculture*. 2025. Vol. 15, iss. 7. 763. <https://doi.org/10.3390/agriculture15070763> (Дата звернення: 29.10.2025)
29. **Ярошович, І. Г., Чайковський, Б. П., Ярошович, В. І., Шалько, А. В.** Навчальний посібник для контролю та перевірки знань здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 204 «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва» з навчальної дисципліни "Охорона праці (Охорона праці в галузі)". Львів. 2024. 123 с. <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/683> (Дата звернення: 29.10.2025)

ДОДАТКИ