

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ШЕЛЕСТ МИКОЛА СЕРГІЙОВИЧ

УДК 631.331

ДИСЕРТАЦІЯ
ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІНОКУЛЯЦІЇ ПОСІВНОГО
МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ПРОСАПНИХ СІВАЛОК

133 – Галузеве машинобудування

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеню
доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів мають відповідні посилання на відповідне джерело

 / М.С. Шелест/

Науковий керівник:
Зубко Владислав Миколайович
доктор технічних наук, професор

СУМИ-2026

АНОТАЦІЯ

Шелест М.С. Обґрунтування параметрів інокуляції посівного матеріалу для просапних сівалок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2026.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню конструкції технічних засобів для передпосівної обробки насінневого матеріалу сільськогосподарських культур шляхом інтеграції інокуляційного модуля у висівну трубку пневматичної сівалки.

Вирішення цієї проблеми дозволяє суттєво підвищити продуктивність та експлуатаційну ефективність сучасних посівних комплексів шляхом автоматизації процесу локальної безтравматичної обробки посівного матеріалу рідкими біологічними препаратами синхронно з висівом. Такий технологічний підхід гарантує збереження цілісності захисних оболонок насіння, забезпечує максимальну життєздатність мікроорганізмів-інокулянтів, сприяє стабільному підвищенню врожайності та мінімізує питомі витрати препарату. Впровадження подібних інженерних рішень є стратегічно важливим завданням для переходу до сталих методів землеробства та розвитку агропромислового комплексу сучасної України.

Об'єкт дослідження – робочий процес автоматизованого інокуляційного модуля у складі висівної пневматичної просапної сівалки.

Предмет дослідження – вплив конструктивно-режимних параметрів роботи інокуляційного модуля висівного апарату на формування багатофазного потоку робочої рідини.

Мета та завдання досліджень.

Метою роботи – поліпшення передпосівної обробки насінневого

матеріалу сільськогосподарських культур шляхом удосконалення конструкції висівної трубки пневматичної сівалки інокуляційним модулем.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено **такі завдання:**

– провести аналіз існуючих технологій та технічних засобів для передпосівної обробки насінневого матеріалу, спрямований на виявлення причин механічного мікротравмування посівного матеріалу та зниження життєздатності мікроорганізмів;

– обґрунтувати конструктивно-технологічну схему та розробити інокуляційний модуль для локального нанесення препарату (in-furrow) безпосередньо у висівній трубці пневматичної сівалки (на прикладі Vega 8 Profi);

– розробити математичну модель та дослідити гідродинамічні закономірності процесу взаємодії аерозольного потоку рідини з насінною під час її вільного падіння для аналітичного визначення раціональних параметрів роботи інокуляційного модулю;

– дослідити механізми взаємодії аерозольної хмари з насінною під час її вільного падіння методами обчислювальної гідродинаміки (CFD) та аналітично визначити раціональні режими роботи гідросистеми (тиск та діаметр сопла);

– розробити експериментальний лабораторний стенд та провести фізичне моделювання процесу для перевірки адекватності математичної моделі й експериментального обґрунтування раціональних конструктивно-режимних параметрів розпилення;

– провести випробування модернізованого посівного агрегату у експлуатаційних умовах для оцінки агротехнічної ефективності розробленої системи (її впливу на біометричні показники рослин та врожайність кукурудзи) порівняно з традиційними методами обробки;

– виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності та фінансової рентабельності впровадження розробленого інокуляційного модуля у

реальний сільськогосподарський виробничий процес.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також наведено дані щодо апробації роботи та кількості опублікованих праць.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану проблеми механізації процесу локального дозування рідкої фази. Встановлено, що існуючі технології завчасної обробки (із застосуванням шнекових чи барабанних змішувачів) мають суттєвий недолік – механічне мікротравмування дисперсного матеріалу та зниження життєздатності активної біологічної фази до моменту висіву. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність переходу до локального методу внесення (in-furrow) та запропоновано інноваційну конструктивно-технологічну схему інокуляційного модуля, що інтегрований безпосередньо у висівний апарат пневматичної сівалки, що виключає травмуючу дію на матеріал.

У другому розділі викладено результати теоретичних досліджень робочого процесу системи. Розроблено аналітичний апарат, що описує просторово-часову динаміку руху багатофазного аерозольного потоку. Створена математична модель комплексно враховує взаємозв'язок між вихідними гідравлічними параметрами форсунки, кінематикою вільного падіння об'єкта обробки в обмеженому просторі висівної трубки та фізико-механічними процесами адгезії крапель.

З використанням методів чисельного моделювання багатофазних потоків (CFD) та методу скінченних об'ємів (FVM) у програмному середовищі ANSYS Fluent досліджено просторову картину процесу локального розпилення. Це дозволило візуалізувати розподіл полів швидкостей і тиску, а також детально вивчити механізм кінематичної взаємодії дискретної фази з поверхнею об'єкта обробки. Встановлено критичні фактори впливу на масу утриманої рідини, зокрема доведено нелінійну залежність ефективності покриття від кінетичної енергії крапель. Її надлишок спричиняє пружний

відскок рідини, а нестача призводить до аеродинамічного знесення мікрокрапель супутнім потоком.

Шляхом розв'язання задачі нелінійної оптимізації та побудови просторових номограм визначено теоретично раціональні параметри функціонування інокуляційного модуля. Аналітично доведено, що використання розпилювача з діаметром сопла 0,3 мм за робочого тиску нагнітання 0,4 МПа забезпечує оптимальний баланс між кінетичною енергією крапель та силами поверхневого натягу. Зазначена комбінація гарантує прецизійне нанесення на одиничний об'єкт цільової дози робочої рідини (0,0025 г) за мінімальної питомої витрати (2,15 л/га), що закладає теоретичне підґрунтя для ресурсоощадності розробленого модуля.

У третьому розділі обґрунтовано загальну програму та методику проведення лабораторних і натурних польових експериментів. Експериментально доведено правомірність використання води як модельної рідини під час лабораторних дослідів (відхилення за густиною від робочого розчину не перевищує 0,6%). Для фізичної імітації процесу локального нанесення розроблено та виготовлено оригінальний експериментальний стенд, оснащений мікропроцесорною системою регулювання тиску та деталями, створеними за допомогою адитивних 3D-технологій.

Дослідження проводилися за матрицею повного факторного експерименту з використанням високоточного гравіметричного методу контролю маси. Також у розділі наведено характеристику ґрунтово-кліматичних умов проведення польових випробувань, обґрунтовано вибір тестової культури (кукурудзи) та описано процес модернізації базового машинно-тракторного агрегату (трактор МТЗ-82 та сівалка Vega 8 Profi) розробленим інокуляційним модулем для роботи в реальних виробничих умовах.

У четвертому розділі наведено результати комплексної практичної верифікації розроблених моделей та оцінено загальну ефективність функціонування інокуляційного модуля в натурних умовах.

За результатами лабораторно-стендових досліджень, із застосуванням критерію Фішера (F) та регресійного аналізу (R^2), експериментально підтверджено високу адекватність теоретичної математичної моделі. Отримано емпіричне рівняння для програмного керування системою та остаточно верифіковано раціональні параметри: тиск нагнітання 0,4 МПа і діаметр сопла 0,3 мм.

Польові випробування модернізованого посівного агрегату довели беззаперечну технологічну перевагу розробленого модуля над традиційними методами обробки. Його застосування дозволило повністю усунути механічне травмування обробленого матеріалу, що сприяло інтенсифікації вегетативного розвитку рослин (збільшення висоти на 11,6%) та забезпечило стабільний приріст урожайності кукурудзи на 9%. Завершує розділ техніко-економічне обґрунтування, яке підтвердило високу експлуатаційну рентабельність запропонованого інженерного рішення; впровадження системи підвищує додатковий чистий прибуток у розмірі 4 320 грн/га порівняно з базовою технологією висіву, повністю демпфуючи витрати на робочу рідину та амортизацію обладнання.

Відповідно до поставленої мети та задач у роботі отримані наступні результати:

– встановлено, що головною причиною зниження ефективності існуючих технологій передпосівної обробки є механічне мікротравмування насіннєвого матеріалу (до 3,0 %) та зниження життєздатності мікроорганізмів під час перемішування, що обґрунтовує необхідність переходу до безтравматичних систем локального нанесення;

– обґрунтовано конструктивно-технологічну схему та розроблено експериментальний зразок інокуляційного модуля, адаптованого до висівної трубки пневматичної сівалки (на прикладі Vega 8 Profi), який забезпечує локальне нанесення препарату за технологією in-furrow;

– розроблено математичну модель, яка аналітично описує гідродинамічні закономірності та просторово-часову динаміку процесу

взаємодії аерозольного потоку рідини з насінною під час її вільного падіння;

– визначено механізми взаємодії аерозольної хмари з насінною на основі методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та аналітично обґрунтовано раціональні режими роботи гідросистеми: робочий тиск 0,4 МПа та діаметр сопла 0,3 мм;

– створено експериментальний лабораторний стенд, за допомогою якого проведено фізичне моделювання процесу, експериментально підтверджено раціональні конструктивно-режимні параметри та доведено високу адекватність розробленої математичної моделі (розрахунковий критерій Фішера $F_p = 2,85 \leq F_T = 4,08$);

– отримано результати натурних польових випробувань, які підтверджують високу агротехнічну ефективність модернізованого посівного агрегату: використання системи усуває пошкодження насіння та забезпечує приріст урожайності кукурудзи на 9% порівняно з традиційними методами обробки;

– доведено економічну доцільність впровадження розробленого інокуляційного модуля: розрахунки засвідчили, що інтеграція системи у виробничий процес гарантує фінансову рентабельність та генерує додатковий чистий прибуток у розмірі 4 320 грн з гектара.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

– визначенні закономірності взаємодії аерозольного потоку робочої рідини з насінною при її вільному падінні в каналі насіннепроводу, які дають змогу обґрунтувати конструктивно-режимні параметри роботи інокуляційного модуля;

– визначені закономірності впливу режимних параметрів гідросистеми інокуляційного модулю на кінцеву масу утриманого на насініні біологічного препарату при переході до припосівного нанесення, яке повністю дає змогу усунути механічне мікротравмування.

Удосконалено:

– метод моделювання гідродинамічної взаємодії багатофазного аерозольного потоку з фізичними об'єктами, у якій враховано кінетичну енергію крапель та сили аеродинамічного опору, що дає змогу кількісно оцінити осідання цільової маси біологічного препарату;

– метод проектування пневмогідролічних систем локального дозування, що на відміну від відомих, базуються на інтеграції алгоритмів мікропроцесорного управління дрібнодисперсним розпиленням в обмеженому просторі висівного апарата для цільового просторового покриття посівного матеріалу в динаміці руху.

Отримало подальший розвиток:

– методика обґрунтування конструктивно-режимних параметрів інокуляційного модуля пневматичної сівалки, яка, на основі поєднання методів чисельного моделювання багатофазних потоків (CFD-аналізу) та фізичного експерименту, дозволяє мінімізувати питомі витрати робочої рідини із забезпеченням заданої якості покриття об'єкта обробки;

– науково-практичні засади проектування та автоматизації робочих процесів пневмогідролічних систем локального дозування, що базуються на інтеграції алгоритмів мікропроцесорного керування та дрібнодисперсного розпилення в обмеженому просторі висівного апарата для цільового просторового покриття посівного матеріалу в русі.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблено інженерну методику та номограми, які дозволяють інженерно-технічним працівникам оперативно визначати раціональні конструктивно-режимні параметри установок припосівної інокуляції (робочий тиск та діаметр сопла) для забезпечення цільового покриття матеріалу за мінімальних питомих витрат робочої рідини;

– спроектовано та виготовлено інокуляційний модуль для локального нанесення рідкої фази, який адаптовано для швидкої інтеграції у висівні системи сучасних пневматичних сівалок точного висіву (на прикладі Vega 8 Profi) без внесення конструктивних змін у їх базові вузли;

– доведено високу техніко-економічну ефективність застосування розробленої машинобудівної конструкції у виробничих умовах: використання модуля усуває жорсткий механічний вплив на матеріал (відсутність мікротравмування) та підвищує якість виконання технологічної операції, що в комплексі забезпечує збільшення врожайності на 9% та гарантує отримання додаткового чистого прибутку на рівні 4 320 грн/га;

– створено експериментальний лабораторний стенд із мікропроцесорним керуванням та вузлами, виготовленими за допомогою адитивних технологій (3D-друку), який може використовуватися в науково-дослідних та навчальних установах для вивчення механіко-технологічних процесів локального дозування рідини в потоці матеріалу.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: огляд і аналіз стану технологій передпосівної обробки насіння, обґрунтування доцільності переходу до системи локального нанесення препарату (*in-furrow*). Розроблення математичної моделі та проведення комп'ютерного моделювання (CFD) просторово-часової динаміки багатофазного аерозольного потоку. Розробка конструкції мікропроцесорного експериментального стенда, проведення фізичного моделювання процесу розпилення та статистична обробка результатів. Участь у проведенні натурних польових випробувань, комплексне обґрунтування раціональних параметрів інокуляційного модуля пневматичної сівалки та виконання техніко-економічних розрахунків щодо доцільності його впровадження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на науково-практичних конференціях (НПК): на XIV Міжнародній НПК «Електроенергетика, електромеханіка та технології в апк» (Харків, ДБУ, 22.12.2022 р.); на 4th multidisciplinary conference for young researchers (Praha, Czech University, 5-

6.10.2023 р.); на НПК викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (Суми, СНАУ, 14-18.04.2025р.); на XXIV Міжнародної НПК «присвяченої 90-річчю від дня народження Леоніда Погорілого» " (Дослідницьке, УкрНДПВТ, 26.05.2024); на НПК викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (Суми, СНАУ, 13-17.04.2026р.).

Основні результати дисертаційної роботи, їх узагальнення та викладені наукові положення та висновки, що становлять суть роботи, отримані та сформульовані автором самостійно.

Ключові слова: кукурудза, врожайність, насіння, добрива, обробка насіння, метод скінчених елементів, коефіцієнт мікропошкодження, інокуляція, урожайність, сівба, зерно, насіннєвий матеріал, рідина.

ABSTRACT

Shelest M.S. Substantiation of seed inoculation parameters for row crop seeders. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 - Mechanical Engineering in the specialty 133 - Industrial Mechanical Engineering. – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2026.

The dissertation is devoted to improving the design of technical equipment for the pre-sowing treatment of agricultural target material by integrating an inoculation module into the delivery tube of a pneumatic planter.

Solving this problem allows for a significant increase in the productivity and operational efficiency of modern seeding complexes by automating the process of local, non-traumatic treatment of the target material with a liquid biological phase synchronously with the main technological operation. Such a technological approach guarantees the preservation of the structural integrity of the processed objects, ensures the maximum viability of the active biological phase (inoculant), contributes to a stable increase in crop yield, and minimizes the specific consumption of the working fluid. The implementation of such engineering solutions is a strategically important task for the transition to sustainable farming methods and the development of the agro-industrial complex of modern Ukraine.

The object of the study is the working process of the automated inoculation module integrated into a pneumatic row planter.

The subject of the study is the influence of the design and operational parameters of the inoculation module on the formation of the multiphase working fluid flow.

The purpose and tasks of research.

The **purpose** of the work is to improve the pre-sowing treatment of agricultural target material by enhancing the design of the pneumatic planter's delivery tube with an integrated inoculation module.

To fulfill the set goal, the following **tasks** must be solved:

- to analyze existing technologies and technical equipment for pre-sowing treatment, aimed at identifying the causes of mechanical micro-trauma to the processed material and the reduction in the viability of the active biological phase;
- to justify the design-technological scheme and develop an inoculation module for local application (in-furrow) directly within the delivery tube of a pneumatic planter (using the Vega 8 Profi as an example);
- to develop a mathematical model and investigate the kinematic regularities of the interaction between the multiphase fluid flow and the processed object during its free fall for the analytical determination of the module's rational operating parameters;
- to investigate the mechanics of interaction between the multiphase aerosol flow and the processed object during its free fall using computational fluid dynamics (CFD) methods, and to analytically determine the rational operating modes of the pneumatic-hydraulic system (pressure and nozzle diameter);
- to develop an experimental laboratory stand and conduct physical modeling of the process to verify the adequacy of the mathematical model and experimentally justify the rational design and operational parameters of the spraying process;
- to conduct operational trials of the modernized planting unit under field conditions to evaluate the technological efficiency of the developed system (its impact on plant biometric indicators and corn yield) compared to traditional treatment methods;
- to perform a technical and economic justification of the feasibility and financial profitability of implementing the developed inoculation module into a real agricultural production process.

The **introduction** substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the study, defines the object and subject, outlines the scientific novelty and practical significance of the obtained results, and provides data regarding the approbation of the work and the number of published papers.

The **first chapter** provides an analysis of the current state of mechanizing the

process of local liquid phase application. It has been established that existing technologies for preliminary treatment (using auger or drum mixers) have a significant drawback: mechanical micro-trauma to the dispersed material and a decrease in the viability of the active biological phase prior to sowing. Based on the conducted analysis, the feasibility of transitioning to a local application method (in-furrow) is justified, and an innovative design-technological scheme of the inoculation module is proposed. This module is integrated directly into the metering system of a pneumatic planter, which eliminates traumatic impact on the material.

The **second chapter** presents the results of theoretical studies of the system's working process. An analytical framework describing the spatio-temporal dynamics of the multiphase aerosol flow has been developed. A mathematical model comprehensively accounts for the relationship between the initial hydraulic parameters of the nozzle, the kinematics of the target object's free fall within the confined space of the delivery tube, and the physico-mechanical processes of droplet adhesion.

Using computational fluid dynamics (CFD) methods and the finite volume method (FVM) within the ANSYS Fluent software environment, the spatial pattern of the local spraying process was investigated. This allowed for the visualization of velocity and pressure field distributions, as well as a detailed study of the mechanism of kinematic interaction between the discrete phase and the object's surface. Critical factors influencing the mass of the retained fluid were established; in particular, a nonlinear dependence of the coating efficiency on the kinetic energy of the droplets was proven. Its excess causes an elastic rebound of the fluid, while a deficiency leads to the aerodynamic drift of microdroplets by the accompanying airflow.

By solving the nonlinear optimization problem and constructing spatial nomograms, the theoretically rational operating parameters of the inoculation module were determined. It was analytically proven that using a nozzle with a diameter of 0,3 mm at an operating discharge pressure of 0,4 MPa ensures an optimal balance between the kinetic energy of the droplets and surface tension forces. This combination guarantees the precision application of the target dose of the working

fluid (0,0025 g) onto a single target object at a minimal specific fluid consumption (2,15 l/ha), which lays the theoretical foundation for the resource efficiency of the developed module.

The **third chapter** justifies the general program and methodology for conducting laboratory and field experiments. The validity of using water as a model fluid during laboratory tests was experimentally proven (the density deviation from the working solution does not exceed 0,6%). To physically simulate the process of local application, an original experimental stand was developed and manufactured, equipped with a microprocessor pressure control system and parts created using additive 3D technologies.

The research was conducted according to a full factorial experiment matrix using a highly accurate gravimetric mass control method. The chapter also describes the soil and climatic conditions of the field trials, justifies the choice of the test crop (corn), and describes the process of modernizing the basic machine-tractor unit (MTZ-82 tractor and Vega 8 Profi planter) with the developed inoculation module for operation under real production conditions.

The **fourth chapter** presents the results of a comprehensive practical verification of the developed models and evaluates the overall operational efficiency of the inoculation module under field conditions.

Based on the results of the laboratory tests, using the Fisher criterion (F) and regression analysis (R^2), the high adequacy of the theoretical mathematical model was experimentally confirmed. An empirical equation for the software control of the system was obtained, and the rational parameters were finally verified: a discharge pressure of 0,4 MPa and a nozzle diameter of 0,3 mm.

Field trials of the modernized planting unit proved the undeniable technological superiority of the developed module over traditional treatment methods. Its application completely eliminated mechanical trauma to the processed material, which contributed to the intensification of the vegetative development of the plants (an 11,6% increase in height) and ensured a stable corn yield increase of 9%. The chapter concludes with a technical and economic justification, which

confirmed the high operational profitability of the proposed engineering solution; the implementation of the system generates an additional net profit of 4,320 UAH/ha compared to the basic seeding technology, fully offsetting the costs of the working fluid and equipment depreciation.

In accordance with the set purpose and objectives, the following results were obtained in the work:

- it has been established that the primary reason for the reduced efficiency of existing pre-sowing treatment technologies is the mechanical micro-trauma of the seed material (up to 3,0%) and the decrease in microorganism viability during mixing, which justifies the necessity of transitioning to atraumatic local application systems;

- the design-technological scheme has been justified, and an experimental sample of the inoculation module adapted to the delivery tube of a pneumatic planter (using the Vega 8 Profi as an example) has been developed, which ensures the local application of the preparation using in-furrow technology;

- a mathematical model has been developed that analytically describes the hydrodynamic regularities and the spatio-temporal dynamics of the interaction process between the aerosol fluid flow and the seed during its free fall;

- the mechanisms of interaction between the aerosol cloud and the seed have been determined based on computational fluid dynamics (CFD) methods, and the rational operating modes of the hydraulic system have been analytically justified: an operating pressure of 0,4 MPa and a nozzle diameter of 0,3 mm;

- an experimental laboratory stand has been created, enabling the physical modeling of the process, experimentally confirming the rational design and operational parameters, and proving the high adequacy of the developed mathematical model (calculated Fisher criterion $F_p = 2,85 \leq F_r = 4,08$);

- results of full-scale field trials have been obtained, confirming the high agrotechnical efficiency of the modernized planting unit: utilizing the system eliminates seed damage and ensures a corn yield increase of 9% compared to traditional treatment methods;

– the economic feasibility of implementing the developed inoculation module has been proven: calculations demonstrated that integrating the system into the production process guarantees financial profitability and generates an additional net profit of 4,320 UAH per hectare.

Scientific novelty of the obtained results:

For the first time:

– the regularities of the interaction between the aerosol flow of the working fluid and the seed during its free fall in the seed tube channel have been determined, which make it possible to justify the design and operational parameters of the inoculation module;

– the regularities of the influence of the operational parameters of the inoculation module's hydraulic system on the final mass of the biological preparation retained on the seed upon transition to at-sowing application have been determined, which completely allows the elimination of mechanical micro-trauma.

Improved:

– the method of modeling the hydrodynamic interaction of a multiphase aerosol flow with physical objects, taking into account the kinetic energy of droplets and aerodynamic drag forces, which allows for a quantitative assessment of the deposition of the target mass of the biological preparation;

– the design method for pneumatic-hydraulic local dosing systems, which, unlike known ones, is based on the integration of microprocessor control algorithms for finely dispersed spraying in the confined space of the metering unit for the targeted spatial coverage of the seed material in motion dynamics.

Received further development:

– the methodology for justifying the design and operational parameters of the pneumatic planter's inoculation module, which, based on the combination of numerical modeling of multiphase flows (CFD analysis) and physical experiment, allows for the minimization of the specific consumption of the working fluid while ensuring the specified coverage quality of the processed object;

– the scientific and practical principles of designing and automating the

working processes of pneumatic-hydraulic local dosing systems based on the integration of microprocessor control algorithms and finely dispersed spraying in the confined space of the metering unit for the targeted spatial coverage of the seed material in motion.

Practical significance of the obtained results:

– developed an engineering methodology and nomograms that allow engineering and technical personnel to quickly determine the rational design and operational parameters of at-sowing inoculation units (operating pressure and nozzle diameter) to ensure targeted material coverage with minimal specific consumption of the working fluid;

– designed and manufactured an inoculation module for the local application of the liquid phase, adapted for rapid integration into the delivery systems of modern precision pneumatic planters (using the Vega 8 Profi as an example) without introducing design changes to their basic units;

– proved the high technical and economic efficiency of using the developed engineering design under production conditions: the use of the module eliminates harsh mechanical impact on the material (absence of micro-trauma) and improves the quality of the technological operation, which collectively ensures a yield increase of 9% and guarantees an additional net profit of 4,320 UAH/ha;

– created an experimental laboratory stand with microprocessor control and components manufactured using additive technologies (3D printing), which can be used in research and educational institutions to study the mechanical and technological processes of local fluid dosing within a material flow.

Personal contribution of the applicant. The theoretical and experimental research results submitted for defense were obtained by the author independently. In the scientific papers published in co-authorship, the applicant is credited with: the review and analysis of the state of pre-sowing seed treatment technologies, and the justification of the feasibility of transitioning to a local preparation application system (in-furrow). Development of the mathematical model and conducting computer simulation (CFD) of the spatio-temporal dynamics of the multiphase

aerosol flow. Design development of the microprocessor-based experimental stand, conducting physical modeling of the spraying process, and statistical processing of the results. Participation in conducting full-scale field trials, comprehensive justification of the rational parameters of the pneumatic planter's inoculation module, and execution of technical and economic calculations regarding the feasibility of its implementation.

Approbation of the dissertation results. The main results of the theoretical and experimental research of the dissertation work were reported, discussed, and received positive feedback at scientific and practical conferences (SPC): at the XIV International SPC "Electric Power Engineering, Electromechanics and Technologies in Agro-Industrial Complex" (Kharkiv, DBU, 22.12.2022); at the 4th multidisciplinary conference for young researchers (Prague, Czech University, 5-6.10.2023); at the SPC of teachers, postgraduate students, and students of Sumy NAU (Sumy, SNAU, 14-18.04.2025); at the XXIV International SPC "Dedicated to the 90th anniversary of the birth of Leonid Pohorilyi" (Doslidnytske, UkrNDIPVT, 26.05.2024); at the SPC of teachers, postgraduate students, and students of Sumy NAU (Sumy, SNAU, 13-17.04.2026).

The main results of the dissertation work, their generalization, and the stated scientific provisions and conclusions that constitute the essence of the work, were obtained and formulated by the author independently.

Key words: corn, productivity, seeds, fertilizers, seed treatment, finite element method, microdamage coefficient, inoculation, yield, sowing, grain, seed materials, fluid.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Shelest M., Kalnaguz A., Datsko O., Zakharchenko E., Zubko V. System of pre-sowing seed inoculation. *Scientific Horizons*. 2023. Vol. 26, no. 7. P. 140–148. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2023.140>.

Здобувачем розроблено прототип системи інокуляції та проведено комплекс експериментальних вимірювань.

2. Shelest M. S., Shuliak M. L., Butenko A. O., Bakumenko O. M., Zubko V. M., Datsko O. M., Masyk I. M., Yatsenko V. M., Sirovitskiy K. H., Rieznik S. V. Efficient maize cultivation: pre-sowing seed inoculation system - optimal nozzle pressure and diameter. *Agronomy Research*. 2024. Vol. 22, No. 2. P. 970–981. <https://doi.org/10.15159/AR.24.082>.

Здобувачем розроблено конструкцію лабораторного стенда та виконано серію експериментальних досліджень.

3. Шелест М. С. Сучасні системи проведення інокуляції посівного матеріалу просапних культур. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2023. Вип. 3 (49). С. 90–97. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.13>.

4. Шелест М. С. Моделювання процесу інокуляції насіння для визначення параметрів розпилу рідини форсункою. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2025. № 4. С. 146–151. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.21>.

5. Шелест М. С. Оптимізація параметрів форсунки для забезпечення цільового покриття насіння робочою рідиною. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2026. № 1. С. 138–142. <https://doi.org/10.32782/msnau.2026.1.20>.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Шелест М. С. Створення моделі висівуючого апарату для просапних культур з можливістю інокуляції при використанні ARDUINO NANO. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (22 груд. 2022 р.). Харків, 2022. С. 204–205. URL: <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/>.

7. Zubko V., Zhyhylii D., Shelest M. Pre-sowing inoculation system and its associated expenses. 4th Multidisciplinary Conference for Young Researchers (MCYR): book of abstracts (Prague, Czech Republic, 5–6 Oct. 2023). Prague, 2023.

Здобувачем виконано 3D-моделювання експериментальних компонентів інокуляційного модуля для лабораторного стенда.

8. Шелест М. С., Мясущка М. С. Система припосівної інокуляції, дослід оптимального тиску та діаметра форсунки. Матеріали XXIV Міжнародної наук. конф., присвяченої 90-річчю від дня народження Леоніда Погорілого (сmt Дослідницьке, 13 верес. 2024 р.). Дослідницьке, 2024. С. 81–84. URL: https://www.ndipvt.com.ua/uploads/ЗБІРНИК_ТЕЗ_2024.pdf.

Здобувачем проведено комплексний лабораторний експеримент із припосівної інокуляції насіння для визначення раціональних режимів розпилення.

9. Шелест М. С. Вплив припосівної інокуляції на ріст і розвиток кукурудзи. Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (м. Суми, 14–18 квіт. 2025 р.). Суми, 2025. С. 346. URL: <https://surl.li/dfxtni>.

10. Шелест М. С. Аналітичне моделювання кінематичної взаємодії насіниниз дрібнодисперсним потоком робочої рідини у висівному трубопроводі. Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (м. Суми, 13–17 квіт. 2026 р.). Суми, 2026. С. 501.

Список патентів:

11. Пат. на винахід 128378 Україна, МПК А01С 1/06, С12М 1/26.

Спосіб припосівної інокуляції насіння / Шелест М. С., Дацько О. М., Плавинський В. І., Захарченко Е. А., Зубко В. М.; винахідники. – № а202200083; заявл. 10.01.2022; опубл. 26.06.2024, Бюл. № 26.

Здобувачем розроблено інноваційний спосіб безтравматичного локального нанесення біопрепарату на насіння під час сівби.

12. Пат. на корисну модель 151278 Україна, МПК А01С 1/06, С12М 1/26. Спосіб припосівної інокуляції насіння / Шелест М. С., Дацько О. М., Плавинський В. І., Захарченко Е. А., Зубко В. М.; винахідники – № u202200077; заявл. 10.01.2022; опубл. 29.06.2022, Бюл. № 26.

Здобувачем запропоновано технологічну концепцію припосівної обробки насіннєвого матеріалу.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ІНОКУЛЯЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР	32
1.1. Поняття інокуляції та реакція рослин кукурудзи на обробку біопрепаратами	32
1.2. Аналіз технічних засобів для проведення інокуляції.....	37
1.2.1. Протруювачі шнекового типу.....	38
1.2.2. Камерні машини з дисковим розпиленням	39
1.2.3. Мультифункціональні комплекси порційної дії (Batch Treaters). 40	
1.2.4. Адаптовані засоби.....	42
1.3. Обґрунтування вибору типу розпилювальних робочих органів для інокуляційного модуля	46
1.4. Аналіз існуючих теоретичних досліджень та методик CFD-аналізу просторово-кінематичного розподілу аерозолів.....	49
1.5. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми експериментального зразка інокуляційного модуля	54
1.6. Висновки до розділу 1	58
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИПОСІВНОЇ ІНОКУЛЯЦІЇ	60
2.1. Обґрунтування вибору форсунки	60
2.2. Моделювання гідродинамічних процесів осадження та утримання інокулянту на поверхні насіння у висівній трубці	63
2.3. Моделювання гідродинамічних процесів, що відбуваються у насінневій трубці під час припосівної інокуляції	78
2.3.1. Розробка тривимірної геометричної моделі висівної трубки.....	80
2.3.2 Топологічна підготовка та формування граничних умов розрахункової області	82
2.3.3. Дискретизація розрахункової області та генерація просторової сітки	83

2.3.4. Вибір типу вирішувача та налаштування базових параметрів математичної моделі	85
2.3.5. Вибір фізичних моделей.....	86
2.3.6. Визначення фізико-механічних властивостей матеріалів	88
2.3.7 Задання граничних та початкових умов обчислювальної моделі.	89
2.3.8. Обґрунтування вибору методів чисельного розв’язання.....	90
2.3.9. Налаштування параметрів вирішувача та критерії.....	93
2.3.10. Методика обробки та аналіз результатів моделювання.....	94
2.4. Аналіз результатів імітаційного моделювання	95
2.5. Оптимізація конструктивно-режимних параметрів пневмогідравлічної системи.....	102
2.6. Висновки до розділу 2	105
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	107
3.1. Програма експериментальних досліджень.....	107
3.2. Методика експериментальних досліджень	108
3.2.1. Методика лабораторних досліджень	108
3.2.1.1. Обґрунтування вибору модельної робочої рідини	108
3.2.1.2.Характеристика експериментальної установки.....	109
3.2.1.3.Методика проведення експериментальних досліджень.....	112
3.2.1.4.Методика обробки та аналізу результатів	113
3.2.2. Методика польових досліджень	114
3.2.2.1. Оцінка ґрунтово-кліматичних умов та місця проведення досліджень	114
3.2.2.2. Характеристика досліджуваного гібрида та біопрепарату	117
3.2.2.3. Схема досліду та методика проведення досліджень	118
3.3. Висновки до розділу 3	121
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ РОБОТИ	123
4.1. Результати лабораторних досліджень впливу конструктивно-	

	24
режимних параметрів на якість проведення інокуляції	124
4.1.1. Аналіз впливу тиску нагнітання на показники маси нанесеного покриття	126
4.1.2. Оцінка технологічних втрат та обґрунтування раціональних режимів	140
4.2. Перевірка адекватності математичної моделі та апроксимація експериментальних даних	128
4.2.1. Порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних залежностей	129
4.2.2. Статистична оцінка адекватності моделі за критерієм Фішера .	130
4.2.3. Апроксимація експериментальних даних	132
4.3. Результати польових досліджень ефективності функціонування розробленої системи	134
4.3.1. Порівняльний аналіз біометричних показників рослин	134
4.3.2. Вплив способу інокуляції на структуру та рівень урожайності	135
4.4. Економічна ефективність застосування розробленої системи припосівної інокуляції	136
4.5. Висновки до розділу 4	138
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142
ДОДАТКИ	162

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Забезпечення стабільного розвитку агропромислового комплексу України та підвищення його експортного потенціалу неможливе без впровадження інноваційних, ресурсощадних технологій вирощування сільськогосподарських культур. В умовах інтенсифікації землеробства та необхідності переходу до екологічно безпечних і сталих методів виробництва, одним із найефективніших шляхів підвищення врожайності є заміна або доповнення традиційних мінеральних добрив біологічними препаратами (інокулянтами).

Проте ефективність застосування мікробіологічних препаратів критично залежить від технології та технічних засобів їх нанесення на посівний матеріал. Аналіз сучасного стану проблеми механізації процесу передпосівної обробки насіння свідчить, що існуючі технологічні рішення (зокрема, використання шнекових, лопатевих чи барабанних протруювачів-змішувачів) мають суттєвий конструктивний недолік. Реалізуючи стратегію завчасної обробки, ці машини здійснюють жорсткий механічний вплив на насіння, що призводить до його мікротравмування, а також спричиняє стрімке зниження життєздатності бактерій-інокулянтів під дією абіотичних факторів ще до моменту потрапляння в ґрунт.

З огляду на це, стратегічно важливим напрямом розвитку галузевого машинобудування є створення технічних систем, здатних забезпечити безтравматичне нанесення препаратів. Найбільш перспективним підходом є перехід до технології локального внесення інокулянтів безпосередньо під час сівби (технологія in-furrow). Інтеграція інокуляційних систем безпосередньо у висівні апарати сучасних посівних комплексів дозволяє автоматизувати процес, скоротити кількість технологічних операцій, мінімізувати питомі витрати дороговартісного препарату та забезпечити миттєву ізоляцію мікроорганізмів у ґрунтовому середовищі.

Вирішення цієї проблеми вимагає глибокого теоретичного та експериментального дослідження гідродинамічних закономірностей взаємодії аерозольного потоку рідини з посівним матеріалом. Таким чином, дисертаційна робота, яка спрямована на обґрунтування параметрів та розроблення інноваційної пневмогідравлічної системи припосівної інокуляції, інтегрованої у висівний апарат пневматичної сівалки, є актуальним науково-прикладним завданням, що має вагомe значення для галузевого машинобудування та агропромислового сектору економіки.

Зв'язок роботи з науковою темою: робота виконана відповідно до комплексної теми наукових досліджень з «Обґрунтування методології синтезу технології; складу елементів машинного парку та оптимального використання ґрунтів за умови максимуму врожайності конкретної сільськогосподарської культури» ДРН: 0124U001116 (2024-2028рр.).

Метою роботи – поліпшення передпосівної обробки насіннєвого матеріалу сільськогосподарських культур шляхом удосконалення конструкції висівної трубки пневматичної сівалки інокуляційним модулем.

Завдання для дослідження:

– провести аналіз існуючих технологій та технічних засобів для передпосівної обробки насіннєвого матеріалу, спрямований на виявлення причин механічного мікротравмування посівного матеріалу та зниження життєздатності мікроорганізмів;

– обґрунтувати конструктивно-технологічну схему та розробити інокуляційний модуль для локального нанесення препарату (in-furrow) безпосередньо у висівній трубці пневматичної сівалки (на прикладі Vega 8 Profi);

– розробити математичну модель та дослідити гідродинамічні закономірності процесу взаємодії аерозольного потоку рідини з насінною під час її вільного падіння для аналітичного визначення раціональних параметрів роботи інокуляційного модулю;

– дослідити механізми взаємодії аерозольної хмари з насінною під час

її вільного падіння методами обчислювальної гідродинаміки (CFD) та аналітично визначити раціональні режими роботи гідросистеми (тиск та діаметр сопла).

– розробити експериментальний лабораторний стенд та провести фізичне моделювання процесу для перевірки адекватності математичної моделі й експериментального обґрунтування раціональних конструктивно-режимних параметрів розпилення;

– провести випробування модернізованого посівного агрегату у експлуатаційних умовах для оцінки агротехнічної ефективності розробленої системи (її впливу на біометричні показники рослин та врожайність кукурудзи) порівняно з традиційними методами обробки;

– виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності та фінансової рентабельності впровадження розробленого інокуляційного модуля у реальний сільськогосподарський виробничий процес.

Об’єкт дослідження – робочий процес автоматизованого інокуляційного модуля у складі висівної пневматичної просапної сівалки.

Предмет дослідження – вплив конструктивно-режимних параметрів роботи інокуляційного модуля висівного апарату на формування багатофазного потоку робочої рідини.

Методи дослідження – в основу дисертаційної роботи покладено комплексний підхід, що поєднує загальнонаукові та спеціальні методи теоретичних і експериментальних досліджень. На етапі вивчення стану проблеми передпосівної обробки насіння, аналізу існуючих конструкцій машин та обґрунтування нової конструктивно-технологічної схеми інокуляційного модуля застосовувалися методи аналізу, синтезу та системного підходу. Для розроблення математичної моделі, дослідження просторово-часової динаміки багатофазного аерозольного потоку та аналітичного визначення раціональних режимів роботи системи використано методи класичної механіки, обчислювальної гідродинаміки (CFD) та метод скінченних об’ємів із застосуванням програмного комплексу ANSYS Fluent.

Лабораторні дослідження на експериментальному мікропроцесорному стенді проводилися з використанням методів фізичного моделювання, високоточної гравіметрії та теорії планування багатофакторного експерименту. Обробка отриманих експериментальних масивів даних, побудова емпіричних моделей та перевірка адекватності теоретичних розрахунків за критерієм Фішера здійснювалися методами математичної статистики та регресійного аналізу. Оцінка агротехнічної ефективності розробленої системи під час натурних випробувань модернізованого посівного агрегату (вплив на розвиток кореневої системи, висоту рослин та врожайність кукурудзи) виконувалася методами польового експерименту та біометричних вимірювань згідно з чинними ДСТУ. Зі свого боку, розрахунок додаткового чистого прибутку, окупності та фінансової рентабельності впровадження розробленої системи у виробництво базувався на методах техніко-економічного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

– визначенні закономірності взаємодії аерозольного потоку робочої рідини з насінною при її вільному падінні в каналі насіннепроводу, які дають змогу обґрунтувати конструктивно-режимні параметри роботи інокуляційного модуля;

– визначені закономірності впливу режимних параметрів гідросистеми інокуляційного модулю на кінцеву масу утриманого на насінні біологічного препарату при переході до припосівного нанесення, яке повністю дає змогу усунути механічне мікротравмування.

Удосконалено:

– метод моделювання гідродинамічної взаємодії багатофазного аерозольного потоку з фізичними об'єктами, у якій враховано кінетичну енергію крапель та сили аеродинамічного опору, що дає змогу кількісно оцінити осідання цільової маси біологічного препарату.

– метод проектування пневмогідролічних систем локального дозування, що на відміну від відомих, базуються на інтеграції алгоритмів

мікропроцесорного управління дрібнодисперсним розпиленням в обмеженому просторі висівного апарата для цільового просторового покриття посівного матеріалу в динаміці руху.

Отримало подальший розвиток:

– методика обґрунтування конструктивно-режимних параметрів інокуляційного модуля пневматичної сівалки, яка, на основі поєднання методів чисельного моделювання багатофазних потоків (CFD-аналізу) та фізичного експерименту, дозволяє мінімізувати питомі витрати робочої рідини із забезпеченням заданої якості покриття об'єкта обробки;

– науково-практичні засади проєктування та автоматизації робочих процесів пневмогідролічних систем локального дозування, що базуються на інтеграції алгоритмів мікропроцесорного керування та дрібнодисперсного розпилення в обмеженому просторі висівного апарата для цільового просторового покриття посівного матеріалу в русі.

У дисертації вперше одержані наступні **наукові результати:**

– встановлено, що головною причиною зниження ефективності існуючих технологій передпосівної обробки є механічне мікротравмування насінневого матеріалу (до 3,0 %) та зниження життєздатності мікроорганізмів під час перемішування, що обґрунтовує необхідність переходу до безтравматичних систем локального нанесення;

– обґрунтовано конструктивно-технологічну схему та розроблено експериментальний зразок інокуляційного модуля, адаптованого до висівної трубки пневматичної сівалки (на прикладі Vega 8 Profi), який забезпечує локальне нанесення препарату за технологією in-furrow;

– розроблено математичну модель, яка аналітично описує гідродинамічні закономірності та просторово-часову динаміку процесу взаємодії аерозольного потоку рідини з насінною під час її вільного падіння;

– визначено механізми взаємодії аерозольної хмари з насінною на основі методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та аналітично обґрунтовано раціональні режими роботи гідросистеми: робочий тиск 0,4 МПа

та діаметр сопла 0,3 мм;

– створено експериментальний лабораторний стенд, за допомогою якого проведено фізичне моделювання процесу, експериментально підтверджено раціональні конструктивно-режимні параметри та доведено високу адекватність розробленої математичної моделі (розрахунковий критерій Фішера $F_p = 2,85 \leq F_T = 4,08$);

– отримано результати натурних польових випробувань, які підтверджують високу агротехнічну ефективність модернізованого посівного агрегату: використання системи усуває пошкодження насіння та забезпечує приріст урожайності кукурудзи на 9% порівняно з традиційними методами обробки;

– доведено економічну доцільність впровадження розробленого інокуляційного модуля: розрахунки засвідчили, що інтеграція системи у виробничий процес гарантує фінансову рентабельність та генерує додатковий чистий прибуток у розмірі 4 320 грн з гектара.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: огляд і аналіз стану технологій передпосівної обробки насіння, обґрунтування доцільності переходу до системи локального нанесення препарату (in-furrow). Розроблення математичної моделі та проведення комп'ютерного моделювання (CFD) просторово-часової динаміки багатофазного аерозольного потоку. Розробка конструкції мікропроцесорного експериментального стенда, проведення фізичного моделювання процесу розпилення та статистична обробка результатів. Участь у проведенні натурних польових випробувань, комплексне обґрунтування раціональних параметрів інокуляційного модуля пневматичної сівалки та виконання техніко-економічних розрахунків щодо доцільності його впровадження.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, з них: 3 статі у фахових виданнях України, 5 конференції, 2 патенти; 2

статті – в зарубіжних виданнях, що індексуються в науково-метричних базах Scopus або WOS. Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків, викладена на 174 сторінках машинописного тексту. Основний зміст роботи викладено на 119 стор., включаючи 32 рисунки та 8 таблиць. Список використаних джерел складається з 171 найменувань на 19 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ІНОКУЛЯЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

Реалізація сучасних екологічно безпечних технологій вирощування сільськогосподарських культур вимагає не лише розробки ефективних біопрепаратів, але й створення відповідного інженерного комплексу машин та обладнання для їх точного внесення. На сучасному етапі розвитку агроінженерії відбувається поступовий перехід від традиційних методів стаціонарної передпосівної обробки насіння до інтегрованих технічних рішень, зокрема розробки систем локальної інокуляції безпосередньо у борозну під час висіву. Це висуває нові вимоги до конструкції, гідродинаміки та надійності робочих процесів сучасних посівних комплексів.

У даному розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану технічного забезпечення процесів інокуляції. Розглянуто агротехнічні передумови застосування біопрепаратів, проаналізовано існуючі конструкції інокуляторів, виявлено їхні технологічні та конструктивні недоліки, а також обґрунтовано напрямки вдосконалення систем внутрішньогрунтової обробки насіння на основі методів математичного моделювання.

1.1. Поняття інокуляції та реакція рослин кукурудзи на обробку біопрепаратами

Зміна ґрунтово-кліматичних умов, зростання чисельності населення, збільшення територій з обмеженим водозабезпеченням це виклики, з якими людство зіштовхується вже сьогодні. Саме забезпечення потреб на кожній фазі росту і розвитку рослин є одним зі шляхів не лише збереження врожайності, але і її підвищення

Останніми роками людство все частіше зосереджує увагу на

технологіях, покликаних зберегти планету. Для цього світові лідери визначили "Глобальні цілі", що сприяють цьому прагненню. Найбільш критичними для існування людини є цілі "збереження сухопутних екосистем" та "ліквідація голоду", адже вони визначають фундамент нашого життя. Одним із можливих шляхів вирішення цих двох проблем є перехід людства на органічне землеробство, що передбачає використання виключно органічних добрив або мікроорганізмів для покращення врожайності та запобігання деградації ґрунту [45, 96, 78].

Інокуляція – ключовий компонент технології вирощування бобових [61, 49, 75, 145, 159] та інших сільськогосподарських культур [2, 62, 150], котра дозволяє збільшити врожайність шляхом введення корисних мікроорганізмів, водночас будучи безпечною для навколишнього середовища. Існує кілька методів інокуляції посівного матеріалу, вибір яких залежить від особливостей препарату та його форми. Зокрема, у сучасній агротехнічній практиці широко застосовується вологий метод інокуляції, що передбачає додавання невеликої кількості води під час обробки насіння [88].

Однією з умов для успішного висіву будь-якої культури є вологість ґрунту, достатня для проростання насіння. Для кукурудзи, скажімо, цей параметр має бути на рівні 30% вологості ґрунту, з температурою не нижче 10-12°C. Разом з тим, для мікроорганізмів, що містяться в інокулянтах, температура також є критичною і повинна коливатися в діапазоні 10-30°C. На сьогодні активно вивчаються нові методи інокуляції насіння, зокрема, безпосередньо у борозні [85, 99, 107].

Таким чином інтенсифікація сільського господарства стає все більш поширеною [13, 121]. Це означає, що агротехнічні методи повинні постійно вдосконалюватися [116]. Сільськогосподарські практики, які включають використання методів сталого сільського господарства, зараз все більше набирають популярності [57]. Стале сільське господарство означає використання таких систем і методів вирощування рослин чи тварин, щоб задовольнити продовольчу потребу людства та ефективно використовувати

ресурси з метою збереження ресурсів і економічної доцільності виробництва [64, 70, 125]. Таке господарство використовує прийоми полікультури, тобто одночасне вирощування декількох культур на одній території [1]; біодинамічне та органічне землеробство [106]; і мульчування [33].

Zea mays, або кукурудза, є однією з найважливіших зернових культур як в Україні, так і в усьому світі, що використовується в технічних і харчових цілях. Таким чином, для забезпечення постійних врожаїв необхідно використовувати найкращу систему удобрення культури [166]. Але через підвищення цін на них зараз використання традиційних мінеральних добрив для інтенсивної технології значно обмежене. Таким чином, попит на удобрювальні продукти значно зріс. Було продемонстровано, що вони ефективні для дослідження впливу їх на біометричні показники кукурудзи [47], урожайність культури [97] та якість її зерна.

Багато вчених в Україні та по всьому світу проводили дослідження, спрямовані на оптимізацію агротехніки та використання біодобрив під час вирощування кукурудзи, щоб підвищити ефективність вирощування [19]. Зокрема, [171] показали, що інокуляція впливає на здатність ризосфери кукурудзи фіксувати азот. Суттєвий вплив на урожайність виявляють також попередники культури. Варто відмітити, що інокулянт має найбільше значення, оскільки мікроорганізми, що містяться в ньому, впливають на досліджувані параметри культури [81]. До речі, у дослідженні [98] доведено позитивний вплив на аборигенну мікрофлору в певних випадках; це означає, що вона не пригнічує її, а навпаки посилює, що має більш позитивний вплив на культури. Не менш важливим є спосіб, за допомогою якого було проведено інокуляцію. Наприклад, [120] показали, що, порівняно з традиційним методом інокуляції, заселення бактерій штаму *Azospirillum* на поверхні ґрунту було більш ефективним і дало значно кращі біометричні показники кукурудзи.

Таблиця 1.1 містить список найпоширеніших ефективних мікроорганізмів, які найчастіше використовують як інокулянти.

Таблиця 1.1 – Вплив ефективних мікроорганізмів на фізіологічні та продуктивні показники сільськогосподарських культур

Характер біологічної дії	Штам мікроорганізму	Джерело
Покращує поглинання азоту рослинами, підвищує врожайність біомаси та зерна кукурудзи, покращує структуру врожаю та стійкість кукурудзи до посухи.	<i>Azospirillum brasilense</i>	[20, 21, 35]
У засолених ґрунтах рослини відчують менший стрес і стають більш стійкими до посухи.	<i>Bacillus</i> spp., <i>Funneliformis mosseae</i>	[3, 8, 16]
Зменшення впливу осмотичного та окислювального стресу внаслідок критичних перепадів температури; підвищення врожайності.	<i>Lysinibacillus</i>	[50, 52]
Підвищення врожайності на засолених ґрунтах	<i>Klebsiella variicola</i> , <i>Kocuria rhizophila</i> , <i>Stemphylium lycopersici</i>	[62, 69, 3]
Підвищення врожайності за рахунок покращення поглинання фосфору рослинами	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Exophiala pisciphila</i> , <i>Enterobacter</i> sp.	[5, 80, 130]
Підвищується секвестрація вуглецю у ґрунті, внаслідок чого покращується врожайність	<i>Funneliformis mosseae</i>	[68, 9]
Підвищення рівня врожайності за рахунок стимуляції вироблення ауксинів	<i>Trichoderma guizhouense</i>	[131].

Однак інокулянти з кількома компонентами, а не з одним штамом бактерій більш рідкісні, зазвичай виробляють багатоконпонентні біодобрива. Наприклад, комбінація із *Anabaena cylindrica* та *Azospirillum brasilense* значно підвищують врожайність кукурудзи [41]. Використання *Bacillus* і *Azospirillum* збільшило масу сухої речовини рослин кукурудзи [100]. Крім того, як показано в роботі [124], інокуляція цими штамми покращує розвиток кукурудзи на засолених і низькофосфорних ґрунтах. Стресостійкість кукурудзи до посухи за даними [123], підвищується за допомогою інокуляції штамми *Serendipita indica*, *Rhizophagus intraradices* та *Azotobacter chroococcum*. Це особливо

важливо в сучасному світі. Тим часом, [71] показали, що грибкові мікроорганізми *Beauveria bassiana* та *Metarhizium anisopliae* також можуть прискорити ріст кукурудзи.

Важливим аспектом застосування інокулянтів є не лише збільшення врожайності будь-яких культур, вирощуваних з їхньою допомогою, а й покращення стану ґрунту [150]. Термін "стан ґрунту" є досить широким поняттям [110]. Деякі науковці визначають його як здатність підтримувати розвиток живих організмів (рослин, тварин та людей), тим самим інтегруючи їх один з одним та формуючи основу для їх функціонування [66]. Інші звертають увагу на стан ґрунту, як на його здатність функціонувати як динамічна система та забезпечувати водні ресурси, родючість рослин та оптимальне середовище для мікроорганізмів, що розкладають органічні речовини [38]. Підтримка стану ґрунту вимагає застосування сталих сільськогосподарських практик, зокрема, скорочення використання мінеральних добрив та збільшення використання органічних добрив [58, 89]. З цією метою доцільно використовувати препарати, що містять ефективні мікроорганізми [94, 105, 84, 87, 113, 103, 44]. Доведено, що внесення *Bacillus subtilis* у контрольованих дозах у ґрунтове середовище позитивно впливає на ґрунт, зокрема, поліпшуючи секвестрацію вуглецю, або ж ці бактерії можуть також діяти як біоремедіатори в ґрунтах, забруднених важкими металами [72]. У дослідженнях [17] та [52] було продемонстровано, що *Bacillus pumilus* здатні активно продукувати ферменти в засолених ґрунтах, тим самим покращуючи їх властивості. Актиноміцети також можуть збільшувати виробництво ферментів, що сприяє покращенню стану ґрунту.

Інтенсифікація сільського господарства зумовлює необхідність удосконалення агрономічних методів, особливо, раціонального використання добрив. Застосування інокулянтів з ефективними мікроорганізмами виявилось перспективною альтернативою мінеральним добривам, сприяючи збільшенню врожайності кукурудзи та покращенню стану ґрунту. Дослідження показали, що такі мікроорганізми, як азоспірили, бактерії та мікоризні гриби, позитивно

впливають на засвоєння поживних речовин та стійкість рослин до стресів. Окрім того, інокулянти допомагають підтримувати родючість ґрунту, баланс мікрофлори та підвищують стійкість до стресових факторів довкілля.

1.2. Аналіз технічних засобів для проведення інокуляції

Однак, реалізація високого біологічного потенціалу мікроорганізмів неможлива без дотримання суворих технологічних вимог до процесу їх нанесення. Ефективність біопрепарату, доведена в лабораторних умовах, може бути повністю знівельована через неякісне обладнання у виробничих умовах. Механічне пошкодження насіння або загибель бактерій через нагрівання чи тертя в робочих органах машин робить процедуру інокуляції беззмисловою. Тому, поряд із вибором штаму бактерій, критично важливим завданням є аналіз та вибір технічних засобів, які здатні забезпечити якісне нанесення препарату без шкоди для посівного матеріалу.

Процес інокуляції посівного матеріалу, на відміну від хімічного протруювання, висуває підвищені вимоги до технологічного обладнання. Ключовими критеріями ефективності машин є не лише продуктивність, а й збереження цілісності оболонки насіння (перикарпію) та забезпечення життєздатності бактерій до моменту висіву. Як зазначають [148] та [151], пошкодження насінневої оболонки навіть на мікрорівні суттєво знижує ефективність дії біопрепаратів.

Аналіз ринку сільськогосподарської техніки та наукових джерел [170, 166] дозволяє класифікувати існуючі технічні засоби для інокуляції на чотири основні групи за принципом дії змішувального пристрою:

1. Машини шнекового типу (безперервної дії).
2. Камерні машини з дисковим розпиленням.
3. Барабанні машини (порційної дії).
4. Адаптовані засоби (бетонозмішувачі, бункерні пристрої).

1.2.1. Протруювачі шнекового типу

Найбільш поширена група машин у вітчизняних господарствах – це самохідні (камерно-шнекові) та стаціонарні протруювачі (ПС-10А (рис.1. 1), ПСШ-5, ПК-20-02 «Супер» та їх аналоги). Технологічний процес у цих агрегатах базується на гравітаційному надходженні насіння в зону попереднього зволоження з подальшим його інтенсивним перемішуванням у кожусі вертикального або похилого вивантажувального шнека [161].

Основні технічні характеристики (ПС-10А):

продуктивність: до 22 т/год;

місткість резервуара: 200 л;

потужність електродвигунів: 5,0 кВт;

частота обертання шнека: 300-400 об/хв;

ширина захвату підбирача: 2090 мм.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд протруювача ПС-10А

Незважаючи на високу продуктивність та відносну простоту конструкції, науковці [168] та [151] відзначають суттєві технічні недоліки використання таких машин для інокуляції біопрепаратами.

Механічне травмування [155] довели, що гвинтова поверхня шнека при силовому контакті з насінням (особливо таких культур, як кукурудза та соя) викликає макро- та мікропошкодження оболонки у межах 1,5-3,0%. Це неприпустимо при інокуляції, оскільки пошкоджена оболонка стає вразливою для ґрунтових патогенів [169].

Низька рівномірність покриття при якому коефіцієнт варіації (CV) перевищує 25%, оскільки розподіл препарату відбувається хаотично за рахунок тертя шарів зерна між собою та об витки робочого органу.

Конструкція закритого шнекового тракту ускладнює його якісне очищення від залишків хімічних фунгіцидів, що є критичним фактором ризику при подальшому нанесенні живих бактерій інокулянту.

1.2.2. Камерні машини з дисковим розпиленням

До цієї групи відносяться машини типу «Мобітокс-Супер» (Mobitox) (рис. 1.2), ПС-20 та їх сучасні модифікації. Їхньою конструктивною відмінністю є наявність камери попереднього розпилення, де ключовим робочим органом виступає швидкообертювий диск. Рідина подається на центр диска і під дією відцентрових сил зривається з його країв, утворюючи дрібнодисперсну аерозольну хмару (туман), через яку гравітаційно проходить кільцевий потік насіння [88].

Основні технічні характеристики (Mobitox-Super):

продуктивність: 8-20 т/год;

місткість резервуара: 100 л;

потужність електродвигунів: 4,5 кВт;

частота обертання розпилювального диска: 2800-3000 об/хв;

діаметр утворених крапель: 100-300 мкм;

ширина: 2300мм.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд Mobitox-Super

Хоча застосування відцентрового розпилення значно покращує первинну якість диспергування рідини та рівномірність покриття насінини, [160] вказує на наявність вузького місця технології. Фінальне перемішування та транспортування насіння до вивантажувальної горловини все одно здійснюється механічними лопатевими або шнековими органами, що не дозволяє повністю усунути проблему травмування посівного матеріалу.

1.2.3. Мультифункціональні комплекси порційної дії (Batch Treaters)

Сучасним світовим стандартом прецизійної обробки насіння є машини порційної дії від провідних виробників (Cimbria серії Centrico, Petkus серії С (рис. 1.3), Willy Niklas). Згідно з даними [74], принцип роботи таких агрегатів базується на використанні відцентрових сил у робочій камері змішування типу «ротор-статор».

Основні технічні характеристики (на прикладі Petkus СТ 100):
продуктивність: до 15 т/год;

маса однієї порції обробки: 100 кг;
час повного робочого циклу: 15-20 секунд;
потужність електродвигунів: 12,57 кВт;
коефіцієнт варіації покриття (CV): < 5%.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд Petkus C 100

Робочим органом є профільований ротор (чаша), що обертається з високою швидкістю. Він піднімає порцію посівного матеріалу по нерухомій стінці статора, після чого воно падає до центру, утворюючи безперервний тороїдальний потік. Впорскування препарату безпосередньо в центр цього потоку через швидкообертювальний розпилювальний диск забезпечує ідеальне покриття без застосування шнеків, що знижує рівень механічного травмування до показників < 0,1%.

Однак висока капіталомісткість обладнання, значна енергоємність та стаціонарне виконання (потреба у монтажі на спеціалізованих насінневих

заводах) роблять ці комплекси практично недоступними для застосування безпосередньо у фермерських господарствах перед сівбою. Це зумовлює об'єктивну необхідність пошуку альтернативних, мобільних та інтегрованих інженерних рішень, таких як системи внутрішньоканальної інокуляції безпосередньо на посівних агрегатах.

1.2.4. Адаптовані засоби

В умовах малих господарств часто використовують бетонозмішувачі. Проте дослідження, які провели [141] демонструють, що цей метод є найменш ефективним. Лопаті змішувачів завдають ударних пошкоджень, а відсутність дозування призводить до перезволоження насіння [149], що в подальшому порушує роботу сівалок.

Крім того, усі розглянуті вище машини реалізують *ex-ante* стратегію (завчасна обробка). Це створює часовий розрив між нанесенням бактерій та їх потраплянням у сприятливе середовище ґрунту, що призводить до часткової загибелі мікроорганізмів ще до моменту сівби. Враховуючи ці недоліки, виникає нагальна потреба в дослідженні альтернативних підходів, зокрема систем *in-furrow* (інокуляції безпосередньо в процесі сівби), які б дозволили поєднати точність дозування з відсутністю механічного впливу на насіння.

Наразі, чітка процедура або спеціалізований агрегат для проведення інокуляції безпосередньо в польових умовах під час сівби не визначені. Проте, деякі науковці вже пропонували механізми розв'язання цієї проблеми [73, 31, 104]. У дослідженнях [22, 54, 108, 27] проведено порівняльний аналіз методів інокуляції та їхнього впливу на культури. Переважно, науковці, а також компанії, які пропонують обладнати посівний комплекс системами для інокуляції, вбачають вирішення питання в застосуванні систем, призначених для внесення рідких мінеральних добрив у ґрунт [91, 118, 156]. Теоретично, такі припущення є слушними. Отже, необхідно проаналізувати відповідність цих систем для обробки посівного матеріалу інокулянтами.

Серед всіх існуючих методів внесення рідких мінеральних добрив, слід виділити ті, що потенційно можуть бути придатні для проведення інокуляції:

1. Системи, що розкривають борозну дисковим робочим органом та дозволяють вносити рідке добриво в борозну (рис.1.4 а);
2. Системи з інжекторним типом (рис.1.4 б) внесення рідких добрив [12];
3. Системи, що розкривають борозну робочим органом типу "лапа культиватора" (рис.1.4 в), з наступним внесенням рідкого добрива у борозну [117].

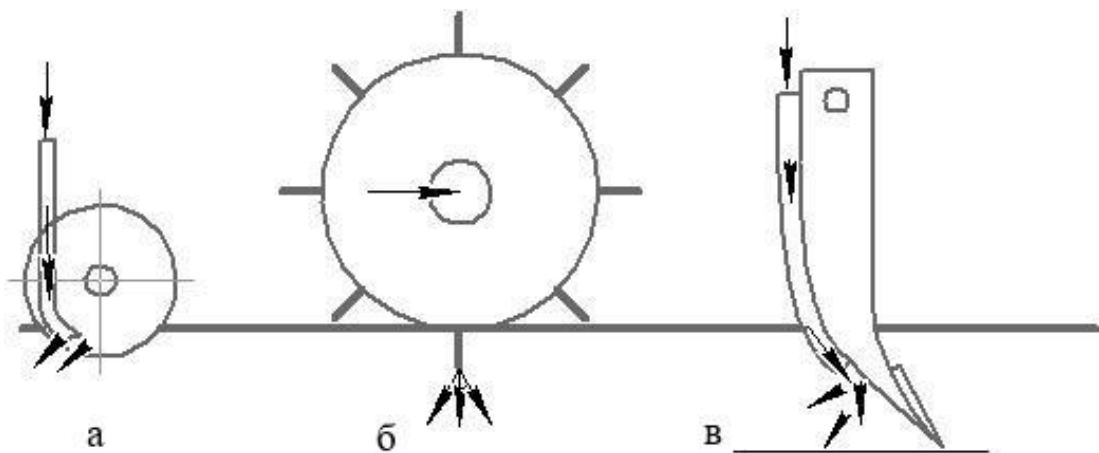


Рисунок 1.4 – Зображення сільськогосподарських машин та робочих органів для внесення рідких добрив.

До того ж, ці системи мають здатність вносити рідкі добрива безпосередньо на зернину, або ж довкола неї на визначеній віддалі [92].

Наприклад, китайські науковці створили посівний комплекс, що якраз належить до першого типу, тобто розкриває борозну диском та може вносити рідкі добрива у борозну перед і після зернини, аби забезпечити розвиток рослин після проростання [134]. Схожу систему внесення рідких добрив у борозну описує [11]. Внесення рідких добрив на ділянках, де застосовують no-till, а борозну формують дисками.

Перевагою таких систем є можливість нанесення інокулянту як безпосередньо на зернину, так і в ґрунт. Проте, недоліком є збільшена витрата рідини.

Одним з найновіших механізмів, що здатні вносити рідкі мінеральні добрива в ґрунт, є так звані ін'єкційні робочі органи [114, 83], що мають форму колеса та своєрідні "голки", або "інжектори", які на виході мають форсунки для внесення добрив у ґрунт (рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Вигляд ін'єкційних робочих органів у польових умовах на прикладі знаряддя «Dragon»

Існує ще один спосіб ін'єкцій, який вводить рідкі мінеральні добрива у ґрунт, сягаючи глибини від 50 до 100 см, з інтервалом кожні 30 см [23, 24]. Китайські науковці розробили аналогічну систему та довели її ефективність [139]. Проте, ці агрегати не часто використовуються з посівними комплексами, натомість їх частіше можна зустріти на машинах, що готують поле до сівби, або техніці для догляду за посівами. Перевага таких систем (при теоретичному використанні безпосередньо під час сівби) полягає у їхній здатності забезпечувати точне внесення мінеральних добрив у ґрунт. Недоліком є відсутність можливості обробляти саму насінину робочим розчином.

Інші механізми, які потенційно можуть бути використані для інокуляції під час сівби, включають посівні комплекси, розроблені для внесення рідких

мінеральних добрив, створюючи борозну робочим органом на кшталт "лапи культиватора". Прикладами таких машин є посівні комплекси Great Plains, John Deere, Horsch та інші. Кожен із них має свої унікальні особливості. Наприклад, Precision Planting розробили сошник Furrow Jet та систему vApplyHD, які дозволяють вносити рідкі мінеральні добрива на певну відстань від насінини, також в борозну. Тоді як посівний комплекс Fendt MOMENTUM надає ширші можливості внесення рідких добрив, до 25 мм вглиб від насінини, компанія John Deere розробила посівні комплекси, які можуть вносити рідкі та гранульовані добрива під час сівби; їх використовували у своїх дослідженнях [63, 93]. В Сербії провели дослідження прототипу сівалки з подібними функціями під назвою EUKU-01 [30]. Проте, дослідження показали, що для інокуляції краще підходять механізми, здатні забезпечувати технологію pop-up [131]. Американські вчені розробили сівалку для малих дослідних no-till ділянок, яка може вносити рідкі мінеральні добрива в рядок за допомогою чизельних ножів [34]. Схожу систему створили в Пакистані, тестування проводилось під час сівби кукурудзи, використовуючи розбавлену водою фосфорну кислоту в якості рідкого добрива. Система здатна внести 4 л рідкого добрива на гектар [7]. Схожа система була розроблена і в Індії, проте добриво вносили не в рядок, а під насінину. Важливо, що прототип даної сівалки не лише розроблений і описаний, а й детально вивчені форсунки, підбирались відповідно до необхідної дози рідких добрив [28]. Інші індійські вчені розробили систему, яка дозволяє вносити добриво під час сівби безпосередньо в борозну [29]. В Україні також розроблена садивна машина, здатна обробляти рідкими мінеральними добривами коренеплоди буряків під час їх посадки [59].

Перевагою таких машин при використанні як системи для інокуляції насіння є, знову ж таки, можливість нанесення робочої рідини безпосередньо на насінину. Водночас, деякі системи не можуть цього забезпечити, оскільки розраховані на внесення рідких добрив на деякій відстані від насінини. Отже, це недолік, як і завищена норма внесення у рядок у деяких посівних комплексах. У більшості проаналізованих досліджень оптимальною нормою

внесення добрива в рядок вважають 50 л/га.

1.3. Обґрунтування вибору типу розпилювальних робочих органів для інокуляційного модуля

Узагальнюючи результати аналізу конструкцій технічних засобів, встановлено, що ефективність роботи інокулюючої системи критично залежить не лише від загальної схеми подачі рідини, а також від характеристик її виконавчого робочого органу – форсунки. Саме тип форсунки визначає дисперсність розпилу, кінетичну енергію крапель та геометрію факела, що є вирішальними факторами для забезпечення адресності інокуляції в динамічних умовах сівби. У зв'язку з цим, виникає необхідність проведення детального аналізу існуючих типів розпилювачів та обґрунтування вибору конкретної моделі форсунки. Так малайзійські вчені досліджували кількість рідини, яку вони можуть пропустити за певної швидкості трактора на одиницю площі [132]. Однак, важливим є не тільки форсунка, якою вноситься рідке добриво, а й швидкість внесення і тиск у системі, ці параметри для внесення рідких добрив досліджували [56]. Вчені з Китаю пішли далі, вивчаючи вплив типу форсунки (конічна чи секторальна) та кількості рідини, що вилита в рядок, на якість посіву та ріст кукурудзи. За їх даними, при використанні секторальної форсунки якість покриття була рівномірнішою, і чим більша кількість води була використана в рядку під час сівби, тим швидше з'являлися сходи культури, при цьому зросла і кількість надземної та підземної біомаси [126]. Експерименти зі струменевою форсункою проводились [138]. Проте, дослідженнями з визначення кількості рідини, що пропускають форсунки, займались і інші вчені [111]. У дослідженнях [108] використали форсунку, що створює туман, а в дослідженнях [128] для обробки насіння інсектицидом в рядку використали форсунки з маркуванням Teejet TP8001EVS, а [40] для тих самих цілей використовували Teejet XR80015EVS. Вченими з Китаю було проведено подібні дослідження для створення сівалки, яка може вносити

пестициди та добрива під час сівби, ними було досліджено три типи форсунок та їх кут розпилення [48]. Дослідження [18] вказують на необхідність використання сенсорів для моніторингу кількості використання добрив, а [10] вивчали можливість підвищення точності внесення рідких добрив після зміни норми. Питанням розробки системи, яка затримує внесення та дозволяє змінювати норму рідких добрив, займались [136]. При цьому, дуже важливо проводити вірне калібрування агромашини, що здійснюють внесення рідких добрив [36]. Також були проведені дослідження з визначення необхідності застосування спеціальних мікропроцесорів для точного внесення рідких добрив [129], контролерів [6, 39], або покращення програмного забезпечення (53).

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що тип розпилювальних форсунок є критичним фактором ефективності інокуляційного модуля. У численних дослідженнях зазначено, що дрібнодисперсні, туманоутворюючі форсунки забезпечують більш однорідне покриття насіння робочим розчином порівняно з традиційними плоскофакельними або крупнокраплинними соплами. Наприклад, [108] вивчали вплив аерозольних форсунок, які генерують дрібнодисперсний туман, на рівномірність покриття оброблюваної поверхні, і встановили, що дрібні краплі «туману» краще заповнюють мікротріщини та нерівності на поверхні об'єкта обробки, що особливо важливо для рівномірного нанесення біопрепаратів на насіння. і дозволяє суттєво підвищити частку активної речовини, що дійшла до оброблюваного об'єкта.

У контексті обмеженого простору насіннепроводу важливим є не лише однорідне покриття, а й здатність дрібнодисперсного аерозолю утримуватися в замкнених каналах довше, перш ніж осісти, що підвищує ймовірність зіткнення крапель із поверхнею насіння. Така поведінка туману в замкнених просторах описана в роботах [48], де вивчали вплив кута розпилення та розміру крапель на розподіл робочої рідини в вузьких каналах. Автори підкреслюють, що дрібнодисперсні форсунки зменшують турбулентні втрати

та забезпечують рівномірнішу концентрацію рідини по перерізу каналу, ніж крупнокраплинні системи.

Важливо також, що для біологічних інокулянтів механічні навантаження та великий розмір крапель можуть призводити до пошкодження життєвої активності мікроорганізмів та зниження ефективності обробки. Це підтверджується загальними висновками оглядів сучасних технологій seed coating, де [90] та [102] підкреслюють, що дозоване туманоутворення й мала енергія удару крапель є важливими для збереження життєздатності біопрепаратів під час нанесення. Вони також відзначають, що дрібнодисперсні краплі краще пристають до мікроструктури оболонки насінини, забезпечуючи стабільніше і довготриваліше прилипання.

У практичних агротехнічних установках дрібнодисперсні форсунки демонструють кращі результати при локальному внесенні рідких добрив та біопрепаратів у безпосередній близькості до насіння, порівняно з традиційними типами. Так, [111] у порівнянні різних схем розпилення показали, що форсунки з найменшим середнім діаметром крапель зменшують нерівномірність покриття на 15-30% у порівнянні з плоскофакельними форсунками традиційного типу.

На основі вищезазначених даних можна обґрунтовано стверджувати, що для інокуляційного модуля оптимальним вибором є туманоутворюючі (дрібнодисперсні) форсунки, які забезпечують:

1. максимальне покриття поверхні насінини при мінімальних обсягах робочого розчину;
2. рівномірний розподіл аерозолю в замкненому каналі насіннепроводу;
3. мінімальний механічний вплив на біологічно активні компоненти інокулянту;
4. покращену адгезію та стабільність нанесеного шару.

Ці властивості роблять туманоутворюючі форсунки найбільш придатними для застосування в задачах точного внесення біопрепаратів під

час сівби, зокрема в умовах механізованого інокулювання насіння кукурудзи.

1.4 Аналіз існуючих теоретичних досліджень та методик CFD-аналізу просторово-кінематичного розподілу аерозолів

На сучасному етапі розвитку інженерної науки механіка суцільних середовищ та галузеве машинобудування зазнали суттєвої трансформації завдяки впровадженню методів комп'ютерної гідрогазодинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD). Дослідження складних робочих процесів, пов'язаних із генерацією, просторовим транспортуванням та осадженням дрібнодисперсних крапель у закритих каналах, неможливо ефективно реалізувати виключно класичними емпіричними методами. Натурні експерименти потребують значних матеріальних витрат, виготовлення складних прозорих стендів із високошвидкісною відеофіксацією і часто не дозволяють повною мірою дослідити швидкоплинні мікрокінематичні явища всередині пневматичних систем.

Аналіз існуючих фундаментальних наукових праць [122, 79, 51] свідчить, що CFD-моделювання є безальтернативним інструментом для тривимірної візуалізації просторово-кінематичного розподілу аерозольної хмари. Воно дає змогу з високою точністю локалізувати зони аеродинамічних завихрень, оцінити градієнти тисків і швидкостей несучого газового потоку, а також математично спрогнозувати ефективність перекриття об'єкта обробки дисперговою рідиною.

Зокрема, у сучасних дослідженнях робочих процесів сільськогосподарських машин [55, 32, 46] доведено, що використання чисельних методів дозволяє оптимізувати конструктивні параметри розпилювальних вузлів ще на етапі їх віртуального проектування. Крім того, ряд авторів [43, 42, 67, 135] підтверджують високу ефективність та адекватність CFD-аналізу для вирішення ресурсномістких задач взаємодії багатофазних потоків (повітря, краплі робочої рідини та рухомі тверді

частинки), що є критично важливим аспектом для вдосконалення технологій суміщеного висіву та інокуляції.

Залежно від фізичної постановки задачі, реологічних властивостей середовищ та об'ємної концентрації дисперсної фази, у світовій практиці комп'ютерного моделювання застосовують три основні парадигми CFD-аналізу багатофазних потоків. Вибір конкретної математичної моделі є критичним кроком, що визначає як достовірність отриманих результатів, так і необхідні обчислювальні ресурси [6]:

1. Ейлерово-Ейлеровий підхід (Eulerian-Eulerian Multiphase Model або Two-Fluid Model) У межах цієї методики реалізується концепція взаємопроникних континуумів. Це означає, що як несуче середовище (повітряний потік), так і дисперсна фаза (сукупність крапель робочої рідини) розглядаються як дві суцільні рідини, що одночасно займають один і той самий макроскопічний об'єм, але мають різні поля швидкостей та тисків. Для кожної з фаз розв'язуються власні усереднені рівняння збереження маси та імпульсу (рівняння Нав'є-Стокса). Взаємодія між середовищами описується через спеціальні витокові члени, що враховують інерційний обмін та сили аеродинамічного опору.

Літературне джерело [95] показує, що метод ідеально підходить для моделювання щільних дисперсних потоків із високою об'ємною часткою рідини (зазвичай понад 10-15 %). Він є надзвичайно ефективним при дослідженні внутрішньої гідродинаміки самих розпилювачів або в процесах, де краплі інтенсивно стикаються між собою, формуючи масове злиття.

Попри математичну строгість, цей підхід має суттєві обмеження для вирішення завдань, пов'язаних із поверхневою обробкою диспергованими препаратами. Оскільки Ейлерова модель оперує виключно поняттям об'ємної частки рідини в розрахунковій комірці, вона не дозволяє відстежувати кінематичну траєкторію кожної окремої краплі в просторі. Відповідно, втрачається можливість детального моделювання мікродинаміки індивідуального зіткнення краплі з насінною. Як зазначають дослідники [140,

86], без дискретного відстеження частинок неможливо коректно застосувати критеріальні рівняння (число Вебера) для аналітичного прогнозування відскоку, розтікання чи вторинного дроблення краплі на восковій поверхні посівного матеріалу. Тому для технологій інокуляції цей метод є недостатньо інформативним.

2. Ейлерово-Лагранжевий підхід (Discrete Phase Model – DPM) у сучасній світовій практиці комп'ютерного моделювання багатофазних течій Ейлерово-Лагранжевий підхід (відомий у програмних комплексах як Discrete Phase Model, DPM) визнано «золотим стандартом» для дослідження аерозолів та спреїв із низькою об'ємною часткою рідкої фази (менше 10-12 %).

Фундаментальна відмінність цього методу полягає у роздільному математичному описі фаз, що ідеально відповідає фізиці процесу розпилення [101, 137]. Повітряний потік розраховується як неперервний континуум у системі координат Ейлера шляхом розв'язання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса. Водночас дисперсна фаза моделюється дискретно і програма відстежує кінематичні траєкторії великої кількості репрезентативних частинок у системі координат Лагранжа. Траєкторія кожної краплі обчислюється шляхом покрокового інтегрування диференціальних рівнянь балансу сил, що діють на неї такі як сили інерції, тяжіння, аеродинамічного опору.

Аналіз літературних джерел [115] демонструє, що метод DPM дозволяє з високою точністю врахувати вплив пульсацій швидкості повітряного потоку на розсіювання крапель (моделі Turbulent Dispersion). Крім того, для дрібнодисперсних фракцій туману адекватно враховується броунівський рух та локальні градієнти тиску, що критично впливають на рівномірність заповнення перерізу трубки.

Найважливішою перевагою моделі DPM для задач інокуляції є можливість використання спеціалізованих субмоделей. Зокрема, моделі вторинного розпаду крапель (Secondary Breakup) дозволяють оцінити зміну дисперсності хмари під дією аеродинамічних сил. З іншого боку, моделі

взаємодії крапель зі стінками (Wall-Film models) дають математичний апарат для розрахунку наслідків зіткнення дисперсної фази з внутрішньою поверхнею висівної трубки та самою насінною [158]. Залежно від локального числа Вебера, метод здатний автоматично прогнозувати режим взаємодії такі як: пружний відскік, розтікання з утворенням плівки або дроблення.

Оскільки робочий процес інокуляції в насіннепроводі характеризується низькою об'ємною концентрацією рідини, але високими вимогами до точності локалізації кожної краплі на поверхні насінниці, Ейлерово-Лагранжевий підхід є найбільш релевантним. Саме цей метод забезпечує найточнішу візуалізацію просторово-кінематичного розподілу аерозольної хмари та дозволяє отримати достовірні кількісні характеристики ефективності перекриття об'єкта обробки.

3. Метод об'єму рідини (Volume of Fluid) методика VOF належить до класу методів відстеження поверхні (interface-tracking) і застосовується переважно для гідродинамічного моделювання процесів із чіткою та неперервною межею поділу фаз. Основна ідея методу полягає у спільному розв'язанні єдиного набору рівнянь Нав'є-Стокса для багатофазної суміші з подальшим обчисленням об'ємної частки кожної рідини в кожній розрахунковій комірці сітки [165].

У дослідженнях розпилювальних систем метод VOF є неперевершеним інструментом для мікромоделювання процесів усередині самого сопла форсунки. Він дозволяє детально дослідити внутрішню гідродинаміку формування рідинної плівки, а також процес первинного розпаду (Primary Breakup) суцільного струменя на окремі зв'язки та первинні краплі безпосередньо на зрізі розпилювача [25, 51].

Головним критичним обмеженням методу VOF є його колосальна обчислювальна ресурсомісткість. Для коректного фізичного відтворення межі «рідина-газ» розмір комірки розрахункової сітки має бути на порядок меншим за розмір самої краплі. Оскільки аерозольна хмара інокулянту складається з мільйонів мікрокрапель діаметром 10-50 мкм, належна просторова дискретизація робочої зони висівної трубки вимагала б генерування

розрахункової сітки з десятками мільярдів елементів [127]. Отже, метод VOF є абсолютно непридатним для макроскопічного розрахунку диспергованої хмари в масштабах усього насіннепровода.

Критичний аналіз існуючих методик CFD-моделювання показує, що для комплексної реалізації завдань, поставлених у дисертаційній роботі, найбільш обґрунтованим є застосування Ейлерово-Лагранжевого підходу (Discrete Phase Model). На відміну від методу VOF, він не вимагає надщільної просторової сітки для розділення фаз, а на відміну від Ейлерово-Ейлерової моделі – дозволяє дискретно відстежити мікрокінематику локального зіткнення диспергованого інокулянту з насінням кукурудзи в турбулентному повітряному потоці висівної системи.

Окремим і надзвичайно важливим аспектом CFD-аналізу пневмогідролічних систем є вибір адекватної моделі турбулентності. Оскільки процес нанесення препарату в каналі насіннепровода сівалки точного висіву відбувається у високошвидкісному потоці, саме вихрові структури та масштаб турбулентності повітря визначають рівномірність диспергування та просторового заповнення робочої зони туманом.

Аналіз фундаментальних літературних джерел з обчислювальної гідрогазодинаміки [65] свідчить, що для задач внутрішньої аеродинаміки закритих каналів найчастіше застосовуються напівемпіричні RANS-моделі (Reynolds-Averaged Navier–Stokes). Їхня перевага полягає у раціональному балансі між високою точністю розрахунку осереднених характеристик потоку та помірними вимогами до обчислювальних ресурсів.

Серед сімейства RANS-моделей найпоширенішими є двопараметричні моделі. Зокрема, моделі сімейства $k - \varepsilon$ (Standard, Realizable) традиційно добре описують розвинений турбулентний потік у вільному (центральному) ядрі трубки [76]. Проте вони мають значні похибки при розрахунках потоків із сильними градієнтами тиску та у в'язкому підшарі.

Для комплексного вирішення задачі внутрішньогрунтової інокуляції найбільш доцільним є використання гібридної моделі турбулентності $k - \omega$

SST (Shear Stress Transport), розробленої Ф. Ментером. Згідно з дослідженнями [163], ця модель автоматично комбінує переваги обох підходів оскільки у вільному потоці вона працює як $k - \varepsilon$, а поблизу твердих поверхонь плавно перемикається на $k - \omega$. Це забезпечує виняткову точність розрахунків у примежових шарах (біля стінок насіннепровода) та, що найголовніше, поблизу мікрорельєфу поверхні самої насінини, де відбуваються складні явища гальмування та відриву турбулентного потоку. Саме коректний розрахунок примежового шару навколо насінини дозволяє точно спрогнозувати кінематику осадження мікрокрапель інокулянту.

1.5 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми експериментального зразка інокуляційного модуля

На основі аналізу сучасних технологій внесення біологічних препаратів під час сівби (підрозділ 1.2.4. Адаптовані засоби) встановлено, що найбільш технологічно обґрунтованим і перспективним є метод внутрішньогрунтової інокуляції за схемою in-furrow, тобто внесення препарату безпосередньо в борозну в зоні розміщення насінини. Такий підхід забезпечує максимальний захист мікроорганізмів від дії абіотичних факторів, зменшує втрати препарату та гарантує безпосередній контакт інокулянту з насіннєвим матеріалом у критичний початковий період росту рослин.

Для реалізації зазначеної технології внутрішньоканальної інокуляції як базову платформу обрано пневматичну сівалку точного висіву Elvorti Vega 8 Profi (рис.1.6 б). Вибір саме цього агрегату, на противагу імпортованим аналогам преміум-сегмента (наприклад, системам ExactEmerge від John Deere чи Maestro від Horsch), обґрунтовується чіткими конструктивно-технологічними та експлуатаційними критеріями.

На відміну від високошвидкісних сівалок (John Deere, Horsch), де насінини транспортується до ґрунту за допомогою складних щіткових транспортерів (BrushBelt) або пневматичних труб надлишкового тиску

(Shooting system), висівний апарат Vega 8 Profi має класичну вакуумну систему з гравітаційною висівною трубкою. Інтеграція аерозольного розпилювача в щітковий транспортер є технологічно невиправданою та призведе до залипання механізмів, тоді як класична висівна трубка дозволяє ефективно сформувати хмару розпилу. Це робить отримані результати досліджень репрезентативними для понад 80% парку просапних сівалок, що експлуатуються в Україні.

Архітектура дводискового сошника та просторове компонування висівної секції сівалки Vega 8 Profi містять необхідні «технологічні вікна». Це забезпечує можливість надійного монтажу експериментального інокуляційного модуля (форсунок, гідромагістралей та датчиків синхронізації) без внесення незворотних змін у базову кінематику машини та без порушення аеродинаміки падіння насінини.

Орієнтація на модернізацію техніки вітчизняного виробництва суттєво підвищує рівень впровадження розробки. Для малих та середніх агропідприємств дооснащення наявної сівалки типу Elvorti розробленим модулем інокуляції є економічно доцільнішим інженерним рішенням, ніж капітальні інвестиції у придбання вузькоспеціалізованих імпорتنих посівних комплексів із вбудованими заводськими системами внесення рідких препаратів.

Технологічний процес дозування та укладання насінневого матеріалу базовою сівалкою реалізується послідовною взаємодією робочих органів висівної секції (рис. 1.6 а) Після переривання дії вакууму в зоні скидання, насінини відривається від отвору дозувального диска пневматичного апарата. Під дією гравітаційних сил вона здійснює спрямований рух внутрішнім каналом насіннепровода до моменту укладання на дно клиноподібної борозни, яка попередньо формується дводисковим сошником.

Важливою конструктивною особливістю цієї системи є те, що насіннепровід утворює локально замкнений аеродинамічний тракт, повністю екранований від впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів (бічних

повітряних потоків, ґрунтового пилу, поживних решток). Завершальним етапом процесу є закриття борозни та ущільнення ґрунту над насінною за допомогою задніх V-подібних прикочувальних коліс, що забезпечує відновлення капілярного зв'язку.

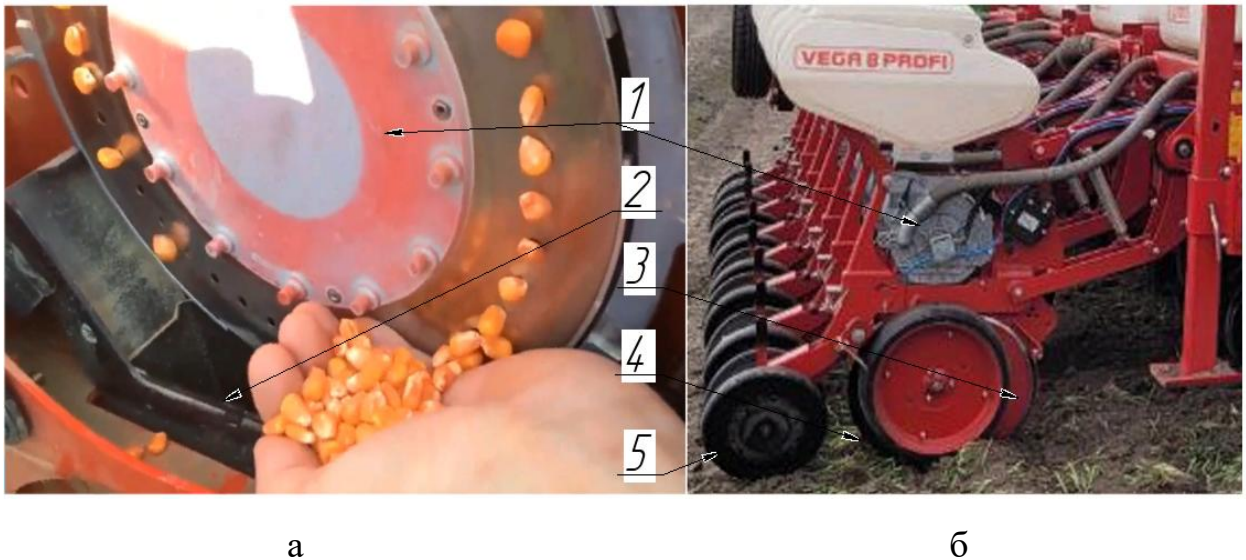


Рисунок 1.6 – Загальний вигляд (б) та конструктивні елементи (а) робочої секції просапної сівалки Vega 8 Profi: 1 – пневматичний висівний апарат; 2 – насіннепровід (висівна трубка); 3 – дводисковий сошник; 4 – зона укладання насіння (дно борозни); 5 – V - подібні прикочувальні колеса.

Саме така просторова конфігурація та наявність захищеного гравітаційного каналу створює ідеальні інженерні передумови для інтеграції розпилювальної форсунки безпосередньо у висівний тракт, що дозволить реалізувати технологію внутрішньоканальної інокуляції під час вільного падіння насінини.

З урахуванням зазначеного, у конструкції даної сівалки доцільно передбачити спеціалізований модуль для інокуляції, інтегрований безпосередньо у висівну секцію, а саме – у канал сім'япровода.

Технічна реалізація запропонованого рішення передбачає:

1. встановлення розпилювальної форсунки малого діаметра (обґрунтування типу наведено у підрозділ 1.3) у стінку висівної трубки в зоні

її виходу до між дискового простору сошника;

2. підведення до форсунки гідравлічної магістралі від автономної системи дозування інокулянту;

3. реалізувати просторову орієнтацію форсунки таким чином, щоб вісь факела розпилу перетинала траєкторію руху насінини в каналі насіннєпроводу.

Впровадження такої схеми забезпечує ряд технологічних переваг (Рис 1.7 б):

1. замкнений простір виключає втрати препарату через вітер;
2. нанесення препарату на насінину відбувається "у польоті", ще до її контакту з ґрунтом, що забезпечує рівномірне покриття;
3. інокулянт потрапляє виключно на поверхню насінини та в зону насіннєвого ложа;
4. мінімальні втрати біопрепарату та стабільність дози.



а

б

Рисунок. 1.7 – загальний вигляд (а) і висівна трубка секції (б) сівалки Elvorti Vega 8 Profi: 1 – сенсор визначення наявності насінини; 2 – висівна трубка; 3 – місце інтеграції форсунки.

Разом з тим, робочий процес інокуляції в умовах вільного падіння характеризується складною взаємодією насінини та факела розпилю. Час перебування насінини в зоні дії форсунки є надзвичайно малим, а ефективність покриття істотно залежить від конструктивно-режимних параметрів таких як кут встановлення форсунки, тиску в гідросистемі, геометрії факела який сформувався.

У зв'язку з цим, емпіричний підбір параметрів не може гарантувати стабільності технологічного процесу. Це зумовлює необхідність теоретичного обґрунтування взаємодії компонентів системи.

Тому наступний розділ дисертаційної роботи буде присвячено розробці математичної моделі взаємодії посівного матеріалу з потоком інокулянту для визначення раціональних параметрів запропонованого пристрою.

Висновки до розділу 1

1. На основі проведеного аналізу існуючих технологічних схем припосівної обробки матеріалу, а також дослідження конструктивних особливостей та недоліків сучасних машин для інокуляції, можна зробити такі висновки:

2. Встановлено актуальність застосування біологічних препаратів під час реалізації агрозаходу – сівбі. Інтенсифікація аграрного виробництва та необхідність переходу до сталих методів землеробства вимагають заміни або доповнення мінеральних добрив ефективними мікроорганізмами (азоспірили, бацили, мікоризні гриби). Доведено, що інокуляція кукурудзи при сівбі сприяє підвищенню врожайності, покращенню азотфіксації, фосфорної мобілізації та стійкості рослин до абіотичних стресів (посуха, засолення), а також позитивно впливає на структуру та родючість ґрунту.

3. Обґрунтовано обмеженість функціональних можливостей наявних технічних рішень для проведення інокуляції. Аналіз конструкцій протруювачів (шнекових, камерних, барабанних) та змішувачів показав, що

вони здебільшого реалізують ex-ante стратегію (завчасну обробку), що призводить до травмування посівного матеріалу (до 1,5-3,0% у шнекових машинах) та зниження життєздатності бактерій до моменту висіву.

4. Встановлено, що найбільш перспективним є метод сівби in-furrow (внесення препарату в борозну під час сівби), який нівелює розрив у часі між обробкою та попаданням у ґрунт.

5. Визначено оптимальний тип розпилювальних робочих органів. На основі порівняльного аналізу доведено, що для нанесення інокулянту у замкненому просторі насіннепроводу найбільш ефективними є дрібнодисперсні форсунки. Вони забезпечують рівномірне покриття насіння ($CV < 5\%$), кращу адгезію препарату, мінімізують механічний вплив на мікроорганізми та дозволяють раціонально використовувати робочу рідину.

6. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему експериментального зразка. Запропоновано модернізацію пневматичної сівалки точного висіву Elvorti Vega 8 Profi шляхом інтеграції інокуляційного модуля безпосередньо у насіннепровід. Обрана схема передбачає обробку насіння дрібнодисперсним потоком інокулянту у фазі вільного падіння (у польоті), реалізовано принцип безтравматичного транспортування насіння, захист препарату від зовнішніх факторів та його локальне внесення в зону проростання.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИПОСІВНОЇ ІНОКУЛЯЦІЇ

Реалізація запропонованої технології дрібнодисперсної інокуляції насіння безпосередньо у висівному тракті сівалки вимагає глибокого теоретичного обґрунтування взаємодії робочих органів розробленої системи. Однією з критичних складових досліджуваного процесу є забезпечення раціонального та цільового осадження робочої рідини на поверхні насінини під час її вільного падіння.

Визначальним елементом розробленої технічної системи виступає вузол розпилювача, оскільки саме його гідродинамічні характеристики безпосередньо формують параметри аерозольної хмари та визначають рівномірність, інтенсивність і точність покриття. Відхилення від раціональних режимів спричиняє порушення технологічного процесу а саме надлишкове нанесення інокулянту що призводить до непродуктивної перевитрати біопрепарату та його гравітаційного стікання з оболонки, тоді як недостатній об'єм рідини зумовлює нерівномірність покриття і зниження біологічної ефективності обробки.

З огляду на це, математичний опис робочого процесу та теоретична оптимізація конструктивно-режимних параметрів розпилювача (зокрема, діаметра вихідного отвору сопла та тиску нагнітання в гідросистемі) є базовим етапом досліджень. Визначення цих аналітичних залежностей дозволить обґрунтувати умови стабільного функціонування модуля інокуляції та забезпечити високу якість передпосівної обробки при мінімізації технологічних втрат препарату.

2.1 Обґрунтування вибору форсунки

Ефективність застосування дрібнодисперсного розпилення у системах

припосівної інокуляції підтверджується дослідженнями [37, 112], які вказують на пряму залежність між зменшенням розміру крапель та покращенням рівномірності покриття насіння. Зокрема, у роботі [82] доведено, що використання спеціалізованих дрібнодисперсний форсунок та раціональний підбір тиску нагнітання дозволяють максимізувати площу контакту робочої рідини з об'єктом обробки без надмірного зволоження. Це є критичною умовою для збереження сипучості посівного матеріалу та запобігання його налипанню у висівному тракті.

На основі аналізу існуючих конструкцій (підрозділ 1.3 обґрунтування вибору типу розпилювальних робочих органів для інокуляційного модуля), як розпилювальний вузол було обрано відцентрову туманоутворюючу форсунку з вбудованим антикрапельним клапаном. Доцільність такого вибору обґрунтовується такими техніко-експлуатаційними перевагами:

1. висока дисперсність розпилу аерозолі з розміром крапель 10-50 мкм забезпечує формування щільної, просторово однорідної хмари, що гарантує ефективне обволікання поверхні насінини під час її вільного падіння;
2. наявність відсічного клапана який миттєво блокує витікання рідини при падінні тиску в магістралі. Це виключає явище «післядії», що запобігає неконтрольованому перезволоженню посівного матеріалу та непродуктивним втратам препарату;
3. конструкція розпилювача містить завихрювач (керамічну вставку), який формує симетричний конус розпилу, що оптимально відповідає циліндричній геометрії насіннепровода;
4. виготовлення вузла з корозійностійких матеріалів, та його модульна конструкція дозволяють проводити санітарне очищення та заміну окремих елементів без потреби демонтажу всієї системи;
5. форсунки даного типу стабільно працюють при надлишковому тиску від 0,2 МПа і легко інтегруються в автоматизовані системи управління, що дозволяє прецизійно дозувати об'єм інокулянту безпосередньо у процесі роботи.

На (рис. 2.1) представлена конструктивна 3D модель дрібнодисперсної форсунки.

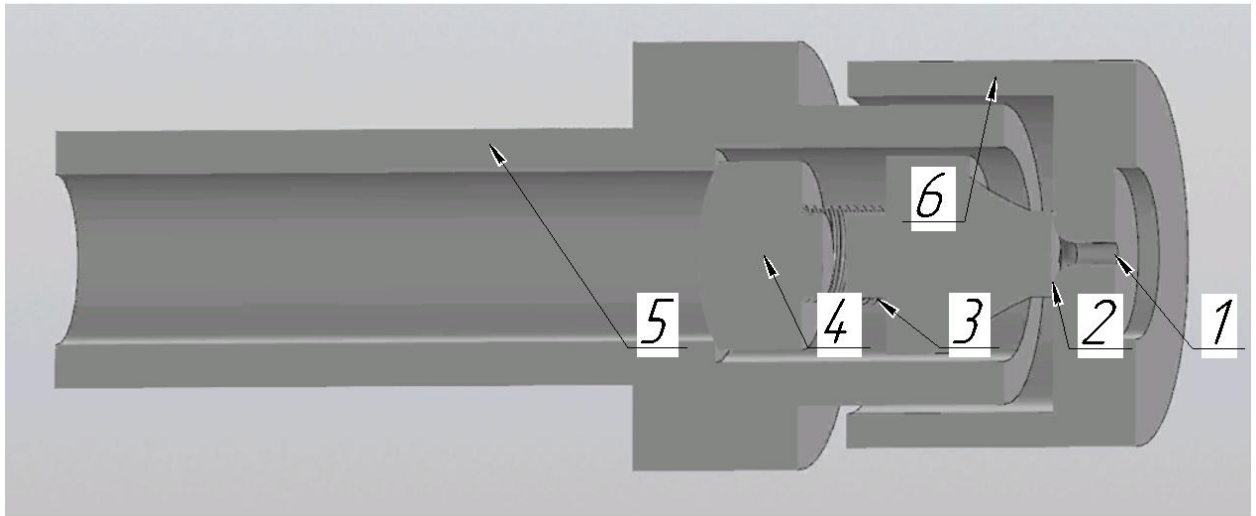


Рисунок 2.1 – 3D модель туманоутворюючої форсунки: 1 – сопловий отвір; 2 – керамічна вставка; 3 – пружина; 4 – резиновий клапан; 5 – корпус форсунки; 6 – корпус розпилювача.

Під час подачі рідини під тиском вона надходить у внутрішню камеру форсунки, де завихрюється спеціальною вставкою (2). Вихровий потік рідини з високою кутовою швидкістю спрямовується до центрального сопла. При проходженні через сопло (1) утворюється тонкий конус туману, який складається з мільйонів мікроскопічних крапель розміром від 10 до 50 мкм. Ці краплі мають низьку інерцію і легко осідають на поверхні насінин, не скочуючись і не випаровуючись завчасно.

Після зупинки подачі рідини антикрапельний клапан (4) спрацьовує автоматично, пружина (3) штовхає кульку в корпусі до звуження та герметично його закриває. Така конструкція унеможливує післядію і значно підвищує точність дозування рідини.

Таким чином, для досягнення технологічної мети необхідно сформувати таку математичну модель, яка дозволить:

1. передбачити умови, за яких крапля рідини надійно утримується на поверхні насінини;

2. визначити мінімально необхідний об'єм рідини для забезпечення заданого покриття;

3. виявити граничні умови (розмір отвору форсунки, тиск), при яких забезпечується максимальна ефективність нанесення при мінімальних витратах.

2.2 Моделювання гідродинамічних процесів осадження та утримання інокулянту на поверхні насіння у висівній трубі

Із рівняння Бернуллі визначаємо швидкість витікання робочої рідини з отвору форсунки:

$$v = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (2.1)$$

де v – швидкість витікання робочої рідини з отвору форсунки, м/с;

P – тиск, який створюється в системі, Па;

ρ – густина рідини, кг/м³.

Площу поперечного перерізу вихідного отвору сопла форсунки визначаємо за відомою геометричною залежністю:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.2)$$

де A – площа поперечного перерізу отвору форсунки, м²;

d – внутрішній діаметр вихідного отвору сопла форсунки, м.

Дійсна об'ємна витрата робочої рідини через вихідний отвір сопла форсунки визначається з урахуванням втрат напору та стиснення струменя за формулою:

$$Q = C_d \cdot A \cdot v = C_d \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (2.3)$$

де Q – об'ємна витрата робочої рідини, м^3 .

Коефіцієнт витрати C_d є безрозмірною емпіричною величиною, яка комплексно враховує гідравлічний опір внутрішнього каналу форсунки та явище звуження струменя при витіканні рідини. Для обраного типу туманоутворювальних форсунок із вбудованим завихрювачем значення цього коефіцієнта приймається на рівні $C_d = 0,7$, що зумовлено втратами частини кінетичної енергії на створення обертального руху потоку всередині камери.

Одразу після проходження зрізу сопла форсунки суцільний потік рідини втрачає гідродинамічну стійкість. Внаслідок взаємодії з повітряним середовищем та дії відцентрових сил плівка рідини розпадається на безліч дрібнодисперсних крапель, формуючи робочу аерозольну хмару (факел розпилу). Далі кінематика кожної окремої краплі в обмеженому просторі насіннепроводу підпорядковується законам аеродинаміки двофазних потоків:

- краплі отримують початкову швидкість, яка визначає початковий напрямок і енергію руху краплі. Чим більша швидкість рідини на виході з форсунки, тим більша буде початкова швидкість крапель, а отже, і дальність їхнього руху;

- на краплі рідини після виходу з форсунки діє сила тяжіння, яка змушує їх прискорюватися у вертикальному напрямку вниз. Сила тяжіння залежить від маси кожної краплі, яка визначається її об'ємом і густиною рідини. Через силу тяжіння крапля набуває вертикальної компоненти швидкості, і внаслідок цього її траєкторія стає криволінійною;

- краплі рідини рухаються в повітрі, яке чинить на них опір. Ця сила опору залежить від кількох параметрів: розміру краплі, швидкості краплі відносно повітря.

Під час руху дрібнодисперсної краплі в повітряному середовищі насіннепроводу на неї діє сила аеродинамічного опору. Оскільки утворені краплі мають малий розмір (10-50 мкм), їхнє обтікання повітряним потоком має переважно ламінарний характер. Тому силу опору повітря доцільно визначати за класичним законом Стокса:

$$F_{\text{оп}} = 6\pi\eta r v, \quad (2.4)$$

- де $F_{\text{оп}}$ – сила аеродинамічного опору повітряного середовища, Н;
 η – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря, Па·с;
 r – радіус краплі робочої рідини, м;
 v – швидкість руху краплі відносно повітряного середовища, м/с.

Для складання диференціального рівняння руху краплі, яке описує зміну її кінематичних параметрів до моменту досягнення усталеної швидкості, необхідно розглянути баланс сил, що діють на неї в робочому просторі насіннепроводу.

Основною рушійною силою, що зумовлює рух краплі вниз, є сила тяжіння. Виразивши масу краплі сферичної форми через її об'єм та густину, отримуємо таку залежність:

$$F_{\text{тяж}} = mg = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot g, \quad (2.5)$$

- де $F_{\text{тяж}}$ – сила тяжіння, що діє на краплю, Н;
 ρ – густина робочої рідини, кг/м³;
 m – маса краплі робочої рідини, кг;
 r – радіус краплі, м;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Динаміку руху краплі в повітряному середовищі насіннепроводу опишемо за допомогою другого закону Ньютона. Векторна сума сил, що діють

на краплю, дорівнює добутку її маси на прискорення:

$$m = \frac{dv}{dt} = F_{\text{тяж}} - F_{\text{оп}}, \quad (2.6)$$

де $\frac{dv}{dt}$ – прискорення руху краплі, м/с²;

t – час, с.

Підставивши у рівняння (2.6) раніше отримані вирази для сили тяжіння (2.5) та сили опору за законом Стокса (2.4), розгорнутий запис набуде такого вигляду:

$$\rho_{\text{кр}} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \frac{dv}{dt} = \rho_{\text{кр}} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot g - 6\pi\eta r v, \quad (2.7)$$

Для оптимізації подальшого інтегрування поділимо обидві частини виразу (2.7) на об'єм краплі ($\frac{4}{3} \pi r^3$) та густину (ρ), після чого виконаємо скорочення спільних множників. У результаті отримаємо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку відносно швидкості:

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{9\eta}{2\rho_{\text{кр}} r^2} \cdot v, \quad (2.8)$$

Розв'язавши диференціальне рівняння (2.8) відносно швидкості, отримуємо експоненційну залежність, яка описує кінематику краплі з плином часу t під сумарною дією сили тяжіння та аеродинамічного опору:

$$v(t) = v_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{9\eta}{2\rho_{\text{кр}} r^2} t} \right), \quad (2.9)$$

де $v(t)$ – миттєва швидкість краплі в момент часу t , м/с;

$v(t)$ – усталена (термінальна) швидкість вільного падіння краплі, м/с;
 e – основа натурального логарифма ($e \approx 2,718$).

Усталена швидкість $v_{уст}$ досягається в момент, коли сила тяжіння повністю врівноважується силою аеродинамічного опору ($\frac{dv}{dt} = 0$), і визначається за формулою:

$$v_{уст} = \frac{2r^2 g \rho_{кр}}{9\eta}, \quad (2.10)$$

Таким чином, математична модель (2.9) демонструє нелінійний характер розгону диспергованої частинки від моменту вильоту із сопла до досягнення нею рівномірного руху ($v_{уст}$).

Просторово-кінематичний розподіл диспергованих крапель у робочому просторі насіннепроводу суттєво залежить від швидкості та характеру супутнього повітряного потоку, а також від фракційного складу аерозолі. За наявності градієнта швидкостей або турбулентних завихрень у повітряному потоці виникає нерівномірний силовий вплив на краплі різної маси. Це може призвести до їхнього злиття або осідання на стінках трубки, що знижує рівномірність покриття насіння. Натомість стабілізація ламінарного повітряного потоку забезпечує прогнозовану траєкторію руху аерозольної хмари та підвищує ефективність інокуляції.

Динаміку повітряного потоку всередині насіннепроводу опишемо за допомогою рівняння Нав'є-Стокса. Воно є центральним у сучасній аеродинаміці та описує рух в'язкої нестисливої рідини або газу під дією зовнішніх та внутрішніх сил.

У загальному векторному вигляді рівняння має такий вигляд:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}, \quad (2.11)$$

- де ρ – густина середовища (повітря або аерозолі), кг/м³;
 \vec{v} – вектор швидкості потоку, м/с;
 t – час, с;
 $\frac{d\vec{v}}{dt}$ – локальне прискорення (зміна швидкості в часі в заданій точці простору), м/с²;
 $(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v}$ – конвективне прискорення (зміна швидкості, зумовлена переміщенням потоку в просторі), м/с²;
 ∇p – градієнт тиску (рушійна сила, викликана перепадом тисків), Па/м;
 $\mu \nabla^2 \vec{v}$ – вектор сили в'язкого тертя на одиницю об'єму (де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с, а ∇^2 – оператор Лапласа);
 \vec{f} – вектор масових (зовнішніх) сил, що діють на одиницю об'єму (сила тяжіння), Н/м³.

Для математичного опису руху дисперсної фази у суцільному газовому середовищі доцільно застосувати дискретно-траєкторний підхід Лагранжа. У межах цієї моделі кожна окрема крапля розглядається як матеріальна точка, що рухається у повітряному потоці, параметри якого попередньо визначені за рівняннями Нав'є-Стокса.

Траєкторія руху кожної краплі визначається шляхом інтегрування диференціального рівняння балансу сил, що діють на неї. У векторній формі рівняння руху частинки за моделлю Лагранжа має такий вигляд:

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_T + \vec{F}_{\text{оп}}, \quad (2.12)$$

- де m_p – маса окремої краплі (частинки), кг;
 \vec{v}_p – вектор швидкості краплі, м/с;

t – час, с;

\vec{F}_T – вектор сили тяжіння ($\vec{F}_T = m_p \vec{g}$, де \vec{g} – вектор прискорення вільного падіння), Н;

$\vec{F}_{оп}$ – вектор сили аеродинамічного опору середовища, Н.

Інтегрування диференціального рівняння (2.12) за часом дозволяє отримати кінематичні характеристики (швидкість та координати) кожної краплі вздовж її траєкторії. Оскільки вектор сили аеродинамічного опору ($\vec{F}_{оп}$) безпосередньо залежить від відносної швидкості обтікання (різниці між вектором швидкості повітряного потоку \vec{v} та вектором швидкості краплі \vec{v}_p), просторовий розподіл інокулянту буде повністю визначатися гідродинамічною структурою повітряного потоку всередині насіннепровода.

Для визначення просторового положення та часу польоту краплі необхідно розглянути її кінематику. Рівняння переміщення частинки вздовж вертикальної осі y з урахуванням прискорення вільного падіння та горизонтальної осі x мають такий вигляд:

$$y(t) = v_{0y}t + \frac{gt^2}{2}, \quad (2.13)$$

$$x(t) = v_{0x}t, \quad (2.14)$$

де $y(t)$ – вертикальне переміщення краплі за час t , м;

v_{0y} – початкова вертикальна складова швидкості краплі (для строго горизонтального розпилу $v_{0y} = 0$), м/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$x(t)$ – горизонтальне переміщення краплі, м;

v_{0x} – початкова горизонтальна складова швидкості краплі, м/с.

Створена форсункою аерозольна хмара має складну багатофазну

структуру. Для спрощення теоретичної оцінки її об'ємних характеристик приймемо такі припущення:

- хмара складається з крапель виключно робочої рідини (без домішок);
- усі краплі мають усереднений радіус (монодисперсне наближення);
- просторовий розподіл крапель в об'ємі хмари є рівномірним;
- кількість утворених крапель є сталою для заданого режиму роботи.

За таких умов загальний об'єм розпиленої рідини за визначений час обробки можна обчислити як:

$$V_{\text{заг}} = Q \cdot t, \quad (2.15)$$

- де $V_{\text{заг}}$ – загальний об'єм розпиленої робочої рідини, м³;
 Q – об'ємна витрата рідини через форсунку, м³/с;
 t – тривалість процесу розпилення (впорскування), с.

Об'єм однієї краплі сферичної форми розраховуємо за відомою геометричною залежністю:

$$V_{\text{кр}} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3, \quad (2.16)$$

- де $V_{\text{кр}}$ – об'єм однієї краплі, м³;
 π – математична константа ($\pi \approx 3,14$);
 D – усереднений діаметр краплі, м.

Для аналітичного прогнозування середнього діаметра краплі використаємо емпіричну формулу для дисперсних форсунок:

$$D = K \cdot d^a \cdot P^{-b}, \quad (2.17)$$

де d – діаметр вихідного отвору сопла форсунки, м;
 P – надлишковий тиск у магістралі форсунки, МПа;
 K, a, b – безрозмірні емпіричні коефіцієнти, що залежать від конструктивного типу розпилювача.

Для дисперсних розпилювачів типу «рідина-повітря» емпіричні коефіцієнти набувають таких значень: $K = 0,9$; $a = 0,3$; $b = 0,15$.

Число Вебера (We) є фундаментальним безрозмірним комплексом, що характеризує співвідношення між силами інерції та силами поверхневого натягу в багатофазному потоці. У фізичному сенсі цей критерій дозволяє оцінити здатність краплі рідини зберігати свою цілісність або руйнуватися (деформуватися) під дією зовнішнього аеродинамічного потоку чи під час зіткнення з перешкодою. Він широко застосовується в задачах, пов'язаних із розпиленням, розривом струменів, а також у моделюванні взаємодії дисперсної фази з твердими тілами, зокрема у процесах інокуляції та зволоження насіння.

Згідно з літературними даними, ефективність осадження робочої рідини при традиційному польовому обприскуванні становить у середньому 25-30 % [33], тоді як у технологіях передпосівної обробки насіння цей показник може бути ще нижчим - близько 15-20 % [126]. Сучасні дослідження вказують, що коефіцієнт ефективності покриття суттєво змінюється залежно від реологічних властивостей рідини, кінематичних характеристик розпилу та мікрогеометрії об'єкта обробки.

Математично число Вебера для краплі визначається за такою залежністю:

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot D}{\sigma}, \quad (2.18)$$

де ρ – густина робочої рідини, кг/м³;

- v – відносна швидкість руху краплі (швидкість зіткнення), м/с;
 D – діаметр краплі, м;
 σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м (для водних розчинів інокулянтів приймається $\sigma \approx 0,072$ Н/м).

Фізична інтерпретація числа Вебера полягає в оцінці балансу між кінетичною енергією краплі та енергією поверхневого натягу, що утримує її сферичну форму. За малих значень ($We < 10 - 12$) сили поверхневого натягу домінують і крапля залишається стабільною, а її деформація при польоті мінімальна. При зростанні We до діапазону 12-40 спостерігається гідродинамічна нестабільність, а за значень понад 100 відбувається інтенсивне руйнування (вторинне дроблення) краплі з утворенням дрібнодисперсного мікротуману.

У контексті дрібнодисперсної обробки в межах висівної трубки значення We визначає кінцевий режим взаємодії рідини з насінною. Якщо число Вебера занадто мале, кінетичної енергії недостатньо для подолання поверхневого натягу, що призводить до пружного відскоку краплі від поверхні насіння без змочування. Якщо ж воно надто велике, крапля розбивається під час удару об ціль, і частина препарату виноситься супутнім повітряним потоком у вигляді вторинного аерозолі. Для забезпечення максимального осадження та утримання інокулянту на насінні кукурудзи, зважаючи на її специфічний восковий шар та мікротекстуру, раціональне значення числа Вебера має перебувати в межах $We = 15 - 50$.

Для розрахунку кількості крапель які сформувались у хмарі:

$$N = \frac{V_{\text{заг}}}{V_{\text{кр}}}, \quad (2.19)$$

де N – загальна кількість крапель у згенерованій хмарі, шт.;

$V_{\text{заг}}$ – загальний об'єм розпиленої рідини, м³ (визначений за формулою

2.15);

$V_{кр}$ – об'єм однієї усередненої краплі, m^3 (визначений за формулою 2.16).

Під час математичного моделювання робочого процесу всередині висівної трубки було прийнято обґрунтоване припущення, згідно з яким аерозольна хмара повністю заповнює внутрішній переріз каналу. Це зумовлено тим, що об'ємна швидкість інжекції рідини через туманоутворюючу форсунку є значною порівняно з локальними розмірами насіннепроводу. Практично одразу після зрізу сопла відбувається швидке розширення струменя внаслідок аеродинамічного опору середовища та вторинного дроблення. В умовах обмеженого простору трубки хмара не має змоги вільно розширюватися у поперечному напрямку, тому рівномірно заповнює весь її внутрішній об'єм.

З огляду на це, просторова насиченість хмари (об'ємна концентрація крапель) розраховується як:

$$n = \frac{N}{V_{тр}}, \quad (2.20)$$

де n – об'ємна концентрація крапель у робочому просторі, шт./ m^3 ;

$V_{тр}$ – внутрішній об'єм робочої ділянки насіннепроводу, m^3 .

Кількість рідини, з якою безпосередньо контактує насінина, залежить від геометричного фактору перекриття. Цей фактор (частка перехоплення) показує, яку геометричну площу поперечного перерізу трубки перекриває насінина під час свого вільного падіння, і розраховується за співвідношенням площ:

$$P = \frac{S_{нас}}{S_{тр}}, \quad (2.21)$$

- де P – кінематичний коефіцієнт перехоплення хмари (безрозмірна величина);
- $S_{\text{нас}}$ – площа міделевого (найбільшого поперечного) перерізу насінини кукурудзи, м²;
- $S_{\text{тр}}$ – площа внутрішнього поперечного перерізу висівної трубки, м².

Кінцевий об'єм робочої рідини, що гарантовано осаджується на насінині, визначає ефективну дозу препарату. Цей об'єм залежить від загальної витрати рідини, геометричного фактора перехоплення та коефіцієнта прилипання, який безпосередньо пов'язаний із числом Вебера (формула 2.18). Математично кінцевий об'єм препарату на насінині визначається як:

$$V_{\text{ос}} = V_{\text{заг}} \cdot P \cdot \eta_{\text{ос}}, \quad (2.22)$$

- де $V_{\text{ос}}$ – кінцевий об'єм інокулянту, що ефективно осів та утримався на поверхні насінини, м³;
- $\eta_{\text{ос}}$ – коефіцієнт ефективності осідання та прилипання крапель.

Для підвищення точності математичної моделі необхідно врахувати, що не всі згенеровані форсункою краплі будуть доступні для взаємодії з насіниною. Частина аерозолі неминуче осяде на внутрішні стінки насіннепроводу під дією гравітаційних сил. Швидкість стаціонарного гравітаційного осідання краплі (з урахуванням сили Архімеда) визначається за уточненим рівнянням Стокса:

$$v_{\text{ос}} = \frac{2r^2(\rho_p - \rho_{\text{п}})g}{9\eta}, \quad (2.23)$$

- де v_{oc} – швидкість стаціонарного осідання краплі, м/с;
 r – радіус краплі, м;
 ρ_p – густина робочої рідини (інокулянту), кг/м³;
 ρ_{II} – густина газового середовища (повітря в трубці), кг/м³;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 η – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря, Па·с.

Час гравітаційного осідання краплі на внутрішню поверхню трубки або ґрунт розраховується як:

$$t_{oc} = \frac{H}{v_{oc}}, \quad (2.24)$$

- де t_{oc} – час осідання краплі під дією сили тяжіння, с;
 H – вертикальний розмір робочої зони інокуляції (висота падіння), м.

З іншого боку, час перебування насінини в зоні диспергованого туману визначається її кінематикою:

$$t_{нас} = \frac{L}{v_{нас}}, \quad (2.25)$$

- де $t_{нас}$ – час транзиту насінини через зону зволоження, с;
 L – довжина зони туману у висівній трубці, м;
 $v_{нас}$ – середня швидкість руху насінини на даній ділянці, м/с.

Фізично обґрунтована оцінка втрат робочої рідини базується на порівнянні часу осідання аерозолі (t_{oc}) із часом транзиту насінини ($t_{нас}$). Можливі три базові режими взаємодії:

– $t_{oc} > t_{нас}$ (Режим ефективного перехоплення) швидкість осідання крапель є незначною. Аерозоль перебуває у зваженому стані в повітряному

потоці під час проходження насінини. Втрати препарату є мінімальними, а ймовірність коагуляції та осадження на поверхню насінини – максимальною.

– $t_{oc} < t_{нас}$ (Режим критичних втрат) краплі осідають на стінки насіннепроводу ще до моменту входження насінини в робочу зону. Це призводить до високих непродуктивних втрат інокулянту та ризику залипання висівного тракту.

– $t_{oc} \approx t_{нас}$ (Перехідний режим) лише частина крапель встигає вступити в контакт з об'єктом обробки, що свідчить про середній рівень ефективності системи та потребує оптимізації тиску нагнітання або діаметра сопла форсунки.

Побудова комплексної математичної моделі процесу осадження робочої рідини з аерозольної хмари на насінину у висівному тракту здійснювалася на основі фізичних закономірностей гідро- та аеродинаміки дисперсних систем. Головною метою цього етапу моделювання було аналітичне визначення об'єму інокулянту, що гарантовано осідає на одиничну насінину під час її вільного падіння крізь сформовану форсункою локальну зону туману.

Архітектура розробленої моделі базується на послідовному синтезі кількох взаємопов'язаних компонентів:

1. прийнято обґрунтоване припущення, що створений розпилювачем аерозоль рівномірно заповнює внутрішній переріз висівної трубки в зоні інжекції.
2. враховано гравітаційне осідання крапель (v_{oc}) та визначено умови їх збереження у зваженому стані до моменту контакту з насіниною на основі порівняння часу транзиту ($t_{нас}$) та часу осідання (t_{oc}).
3. введено кінематичний коефіцієнт P , який описує ймовірність зіткнення краплі з насіниною через відношення площ їхніх міделевих перерізів.

Узагальнивши всі попередньо виведені складові (рівняння Бернуллі для витрати, геометричні площі перекриття та критеріальні коефіцієнти), була виведена зведена цільова функція математичної моделі:

$$V_{oc} = \left(C_d \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2P_c}{\rho}} \cdot t \right) \cdot \left(\frac{S_{нас}}{S_{тр}} \right) \cdot \eta_{oc}, \quad (2.26)$$

де V_{oc} – кінцевий об'єм робочої рідини, що ефективно осіла та утримався на насініні, м³;

C_d – коефіцієнт витрати розпилювача (емпірична константа форсунки)

π – математична константа ($\pi = 3,14$);

d – внутрішній діаметр вихідного отвору сопла форсунки, м;

P_c – робочий (надлишковий) тиск рідини в системі нагнітання, Па;

ρ – густина робочої рідини (інокулянту), кг/м³;

t – тривалість процесу розпилення, с;

$S_{нас}$ – площа міделевого поперечного перерізу насініни, м²;

$S_{тр}$ – площа внутрішнього поперечного перерізу висівної трубки, м²;

η_{oc} – коефіцієнт ефективності осідання та прилипання крапель (функція від числа Вебера та змочуваності).

Коефіцієнт ефективності осідання та прилипання η_{oc} є комплексним емпіричним параметром, який характеризує ймовірність закріплення краплі на поверхні насініни після кінематичного контакту. Аналітично цей коефіцієнт подається як функція від числа Вебера (We) та крайового кута змочування (θ), який характеризує гідрофобність (восковий шар) поверхні насініни кукурудзи:

$$\eta_{oc} = f(We, \cos \theta). \quad (2.27)$$

Залежно від енергетики удару (числа Вебера), значення коефіцієнта η_{oc} визначається за такою кусково-заданою логікою:

при $We < 15$ (дефіцит кінетичної енергії) переважає пружний відскік краплі, і значення $\eta_{oc} \rightarrow 0$;

при $We = 15 - 50$ (раціональний режим) відбувається максимальне розтікання та закріплення інокулянту, $\eta_{oc} \rightarrow max$;

$We > 50$ (надлишок кінетичної енергії) відбувається вторинне дроблення та часткова втрата препарату, що призводить до нелінійного зниження η_{oc} .

Точне кількісне значення коефіцієнта η_{oc} для конкретного типу інокулянту та гібриду насіння кукурудзи встановлюється експериментальним шляхом під час проведення лабораторних досліджень робочого процесу інокуляції.

2.3 Моделювання гідродинамічних процесів, що відбуваються у насіннєвій трубці під час припосівної інокуляції

На основі аналізу математичної моделі робочого процесу встановлено, що визначальний вплив на якість виконання технологічної операції мають два конструктивно-режимні параметри такі як тиск подачі робочої рідини (P) та діаметр вихідного отвору розпилювача форсунки (d). Зазначені величини є основними керуючими факторами, що формують характеристики аерозольного потоку (витрату, дисперсність, кінетичну енергію крапель) та визначають ефективність взаємодії робочого середовища з насінною.

Оскільки інтегральні показники ефективності інокуляції (рівномірність покриття, коефіцієнт втрат препарату) функціонально залежать від структури факела розпилення, завдання розроблення вузла зводиться до обґрунтування раціональних значень тиску та діаметра сопла. Оптимізація цих параметрів дозволяє забезпечити виконання агротехнічних вимог до нанесення біопрепаратів при мінімальних енергетичних та матеріальних витратах.

На основі аналізу математичних апаратів дослідження гідродинаміки дисперсних систем, проведеного у першому розділі роботи, встановлено, що

використання виключно аналітичних методів не дозволяє повною мірою врахувати просторову складність потоку всередині насіннепроводу. Оскільки робоче середовище є багатофазним (повітря, краплі інокулянту, рухомі насінини кукурудзи), а геометрія каналу має специфічний профіль, найбільш адекватним та точним інструментом для вирішення поставленої задачі є метод чисельного моделювання (Computational Fluid Dynamics – CFD). Застосування CFD-аналізу дає змогу візуалізувати просторово-кінематичний розподіл аерозольної хмари та визначити локальні зони максимального перекриття туману з насіниною.

Для реалізації цього етапу обрано програмний комплекс ANSYS Fluent 2024 R1 (метод скінченних об'ємів). Такий підхід дозволяє детально проаналізувати локальні характеристики потоку всередині робочої зони, що є необхідною умовою для верифікації аналітичних розрахунків та прийняття обґрунтованих конструкторських рішень.

Застосування ANSYS Fluent дає змогу змоделювати складну гідродинаміку багатофазного потоку, що формується внаслідок диспергування робочої рідини, та дослідити процеси її взаємодії з дискретною фазою – посівним матеріалом. Завдяки використанню моделей багатофазного середовища (Multiphase models), реалізовано можливість кількісної оцінки якості інокуляції в умовах, наближених до реальної експлуатації машини. Це забезпечує прогнозування ефективності нанесення препарату при варіюванні швидкості руху компонентів та геометрії висівного каналу.

У межах чисельного експерименту відтворено робочий процес упорскування рідини та її контакт із рухомою насіниною. Основна увага приділялася аналізу динаміки розпилення та механізму адгезії (прилипання) крапель до поверхні об'єкта, що є визначальним для забезпечення рівномірності покриття.

Таким чином, використання середовища ANSYS Fluent для дослідження робочих процесів у висівній системі є методологічно обґрунтованим з позицій сучасного машинобудування. Цей підхід гарантує високу достовірність

результатів, дозволяє визначити вплив конструктивно-режимних параметрів на показники ефективності обладнання та створює наукове підґрунтя для його подальшої оптимізації.

При моделюванні приймалися такі припущення:

1. Об'єкт дослідження представлено у вигляді спрощеної геометричної моделі, метричні параметри та форма якої апроксимовані до фізичних характеристик натурального зразка.

2. Як робочу рідину використано воду з густиною 1003 кг/м^3 . Впливом концентрації діючої речовини інокулянту на реологічні властивості рідини знехтувано, оскільки він є статистично незначущим [112].

3. Геометрія висівної трубки ідентична конструктивним параметрам штатного елемента висівного апарата. Фізичні властивості стінок каналу задано відповідно до характеристик акрилонітрилбутадієнстирольного (ABS) пластику.

4. Стінки висівної трубки розглядаються як абсолютно тверде тіло. Пружними та залишковими деформаціями конструкції під дією гідродинамічних навантажень знехтувано задля забезпечення стабільності розрахункової сітки.

5. Наявність сторонніх твердих включень (пилу) в розрахунковій моделі не враховується з огляду на їх незначний вплив на інтегральні характеристики потоку.

6. Час перебування насінини в робочій зоні висівного каналу прийнято сталим. Значення цього параметра визначається розрахунковим шляхом на основі геометричної довжини зони обробки та середньої швидкості падіння насінини.

2.3.1. Розробка тривимірної геометричної моделі висівної трубки

Геометричне моделювання висівної трубки виконано в параметричному середовищі САПР SolidWorks 2024 (рис. 2.2). Для забезпечення відповідності

цифрової моделі фізичному об'єкту, попередньо проведено інструментальні заміри натурального зразка штатного робочого органу.

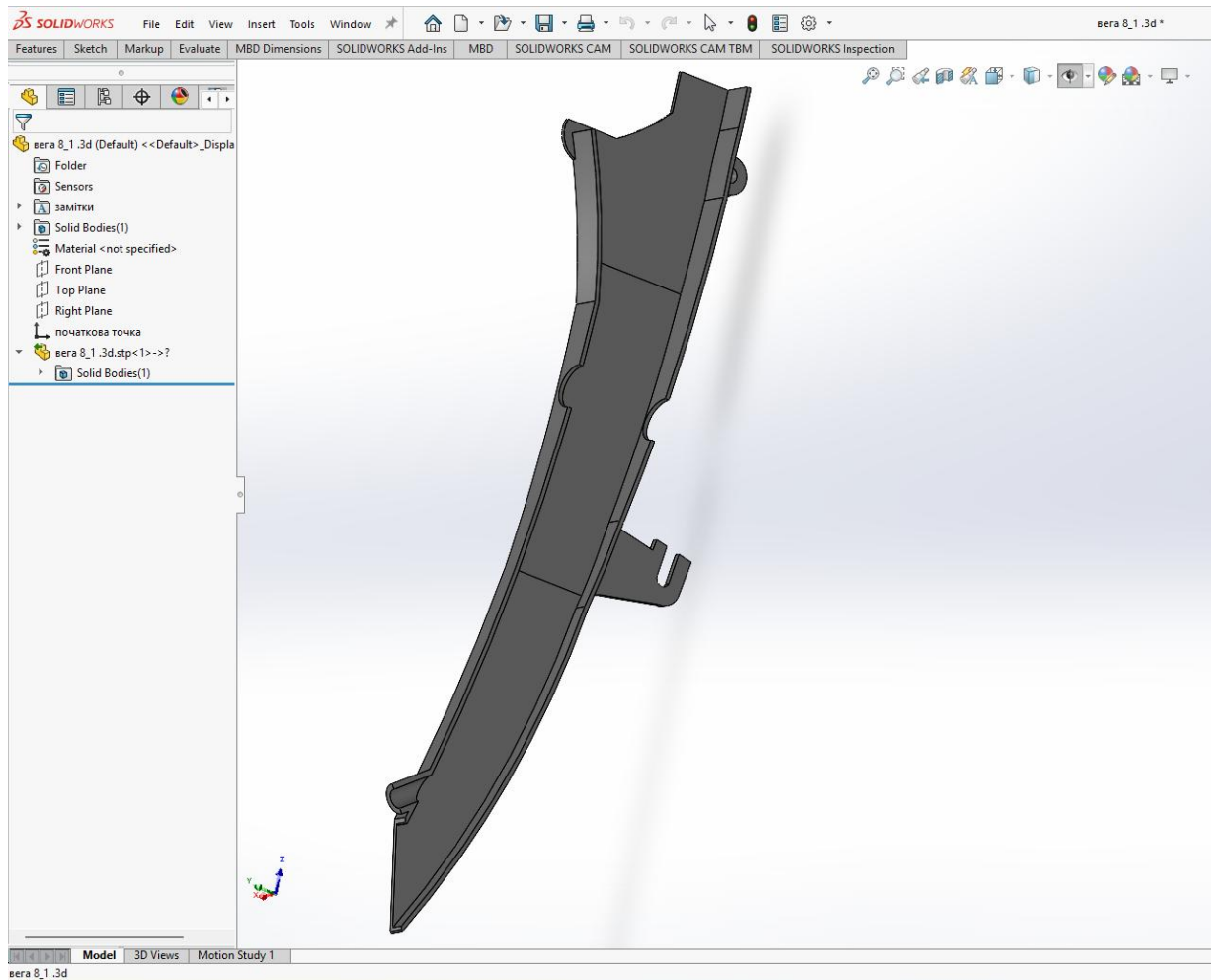


Рисунок 2.2 – Базова CAD-модель робочого органу у поздовжньому розрізі

Визначення ключових конструктивних параметрів (довжини, внутрішнього та зовнішнього діаметрів, профілю кривизни каналу, радіусів заокруглень) здійснювалося за допомогою універсального вимірювального інструменту (штангенциркуль, мікрометр) та радіусних шаблонів. Отримані розмірні ланцюги слугували базою для побудови тривимірної твердотільної моделі.

Створена геометрія з високою точністю відтворює просторову конфігурацію реального вузла, що є необхідною умовою для забезпечення адекватності подальшого чисельного моделювання гідродинамічних процесів.

2.3.2 Топологічна підготовка та формування граничних умов розрахункової області

Після завершення параметричного проектування в САД-системі SolidWorks 2024, геометричну модель висівної трубки було експортовано в нейтральний формат обміну даними IGES (.igs) для подальшого імпорту до модуля передобробки ANSYS DesignModeler. Вибір даного формату забезпечив збереження цілісності поверхонь та коректну передачу топології виробу до середовища САЕ-аналізу (рис. 2.3).

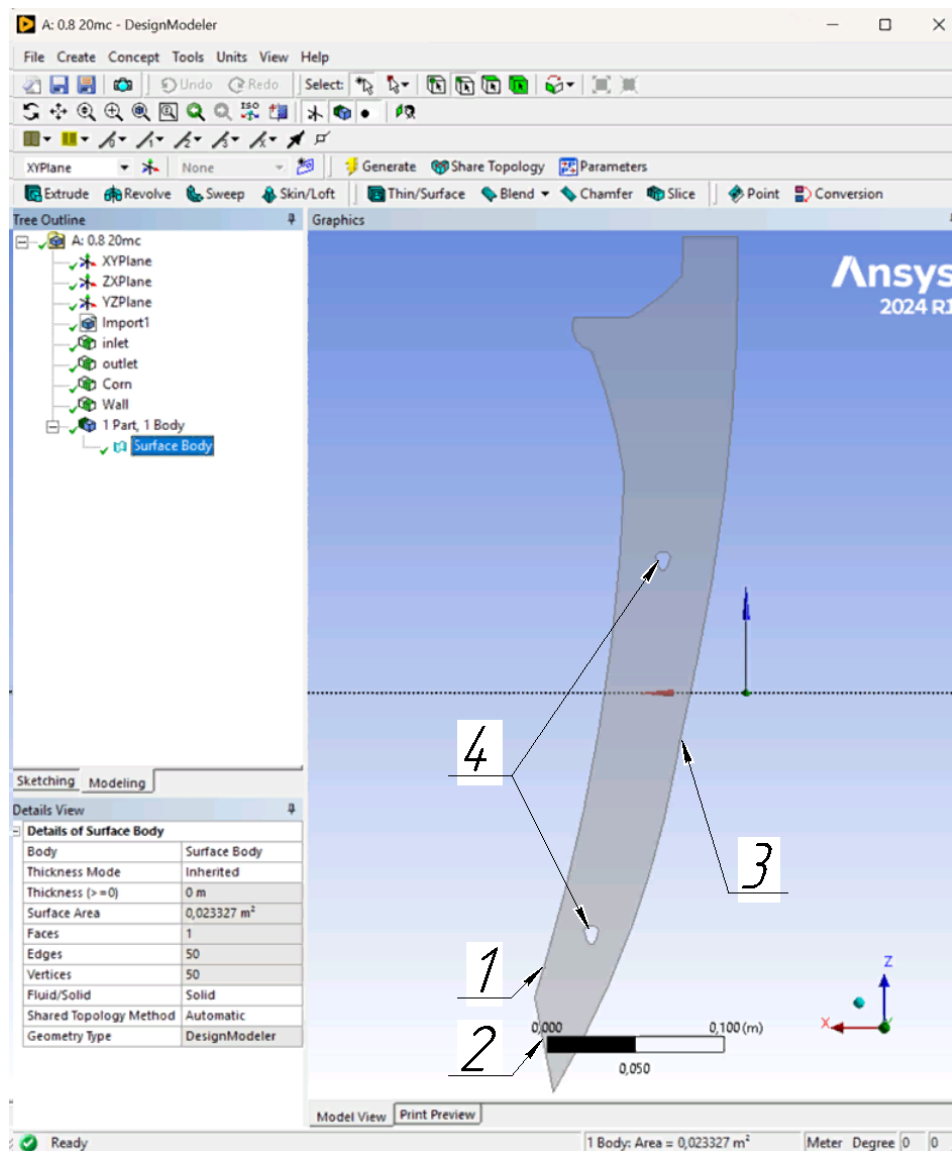


Рисунок 2.3 – Схема розрахункової області моделі та ідентифікація її граничних поверхонь: 1 – Inlet; 2 – Outlet; 3 – Wall; 4 – Seed_wall.

Ключовим етапом роботи в DesignModeler стала ідентифікація та класифікація поверхонь для подальшого задання граничних умов (Named Selections). На розрахунковій схемі (рис. 2.3) виділено такі функціональні зони:

1. Inlet – вхідний переріз сопла для подачі робочої рідини;
2. outlet – вихідний переріз трубки (атмосферний тиск);
3. wall – внутрішні стінки висівного каналу (умова прилипання/відбиття);
4. seed_wall – поверхня насінини, що взаємодіє з двофазним потоком.

Чітка структуризація поверхонь дозволила сформувати замкнену розрахункову область та стала необхідною передумовою для генерації розрахункової сітки в модулі ANSYS Meshing і коректного налаштування фізичних моделей у вирішувачі ANSYS Fluent.

2.3.3. Дискретизація розрахункової області та генерація просторової сітки

Для дискретизації обчислювального об'єму побудовано неструктуровану розрахункову сітку (Unstructured Mesh) на основі тетраедричних елементів. Вибір цієї топології зумовлений складною геометрією висівної трубки з наявністю криволінійних поверхонь, що унеможлиблює використання регулярних гексаедричних структур без втрати якості апроксимації геометрії. Генерація сітки виконувалася в модулі ANSYS Meshing із застосуванням адаптивних алгоритмів.

З метою підвищення точності розрахунку в зонах високих градієнтів швидкості та тиску застосовано метод локального подрібнення сітки (Sizing). Як видно з (рис. 2.4), зони підвищеної щільності елементів сформовано навколо соплового отвору форсунки (1) та поверхні насінини (2). Це дозволило деталізувати структуру потоку в області розпилення та коректно відтворити механізм взаємодії крапель з об'єктом обробки.

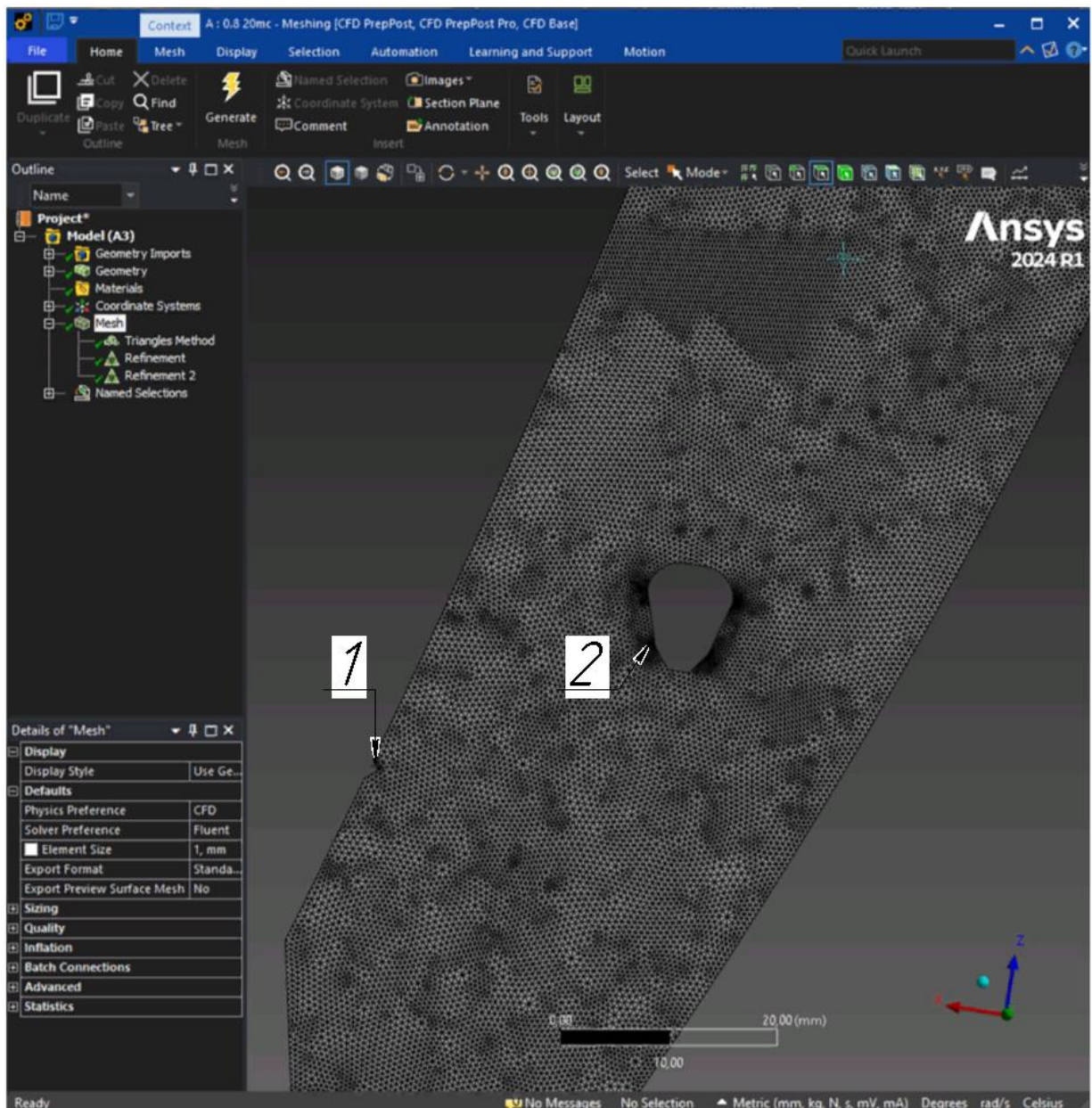


Рисунок 2.4 – Фрагмент розрахункової сітки з локальним подрібненням елементів: 1 – зона інжекції (сопло); 2 – примежова зона насінини.

Для моделювання гідродинаміки в пристінних областях застосовано технологію призматичних шарів (Inflation Layers). Було згенеровано спеціалізовані шари комірок, орієнтовані по нормалі до твердих поверхонь (стілки трубки, насінини). Це забезпечує коректну роздільну здатність сітки в межах примежового шару, що є критично важливим для розрахунку параметрів турбулентності та дотримання вимог до безрозмірної координати стінки y^+ обраної моделі турбулентності.

Розмірні характеристики сіткової моделі варіювалися залежно від локальних умов течії: мінімальний розмір елемента в критичних зонах становив 0,01 мм, максимальний – до 1 мм у периферійних ділянках. Така адаптивна стратегія забезпечила оптимальний баланс між обчислювальними витратами та точністю отриманих результатів.

2.3.4. Вибір типу вирішувача та налаштування базових параметрів математичної моделі

Після завершення етапу препроцесингу та імпорту сіткової моделі в середовище ANSYS Fluent здійснено конфігурацію базових параметрів чисельного алгоритму в модулі General (рис. 2.5). Коректна постановка задачі на цьому етапі є визначальною для забезпечення збіжності розрахунку та адекватності відтворення фізики процесу інокуляції.

Типом вирішувача (Solver Type) обрано алгоритм на основі тиску (Pressure-Based). Вибір цього алгоритму є абсолютно обґрунтованим при моделюванні течій нестисливого середовища (повітря при низьких числах Маха), що відповідає реальним аеродинамічним умовам роботи висівного пристрою. Розрахунок полів тиску та швидкості здійснюється на основі зв'язаних рівнянь нерозривності та збереження імпульсу (рівнянь Нав'є-Стокса).

Для часової дискретизації (Time) обрано стаціонарний режим (Steady). Це дозволяє отримати усталену картину розподілу швидкостей та концентрацій фаз, що відповідає номінальному режиму роботи обладнання без урахування перехідних процесів його запуску. Формулювання швидкості (Velocity Formulation) виконувалося в абсолютній системі відліку (Absolute), що є стандартним підходом для нерухомих розрахункових областей.

Вплив масових сил на структуру потоку враховано шляхом активації гравітаційного прискорення $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Вектор гравітації спрямовано вздовж осі X (відповідно до візуалізації на рис. 2.5),

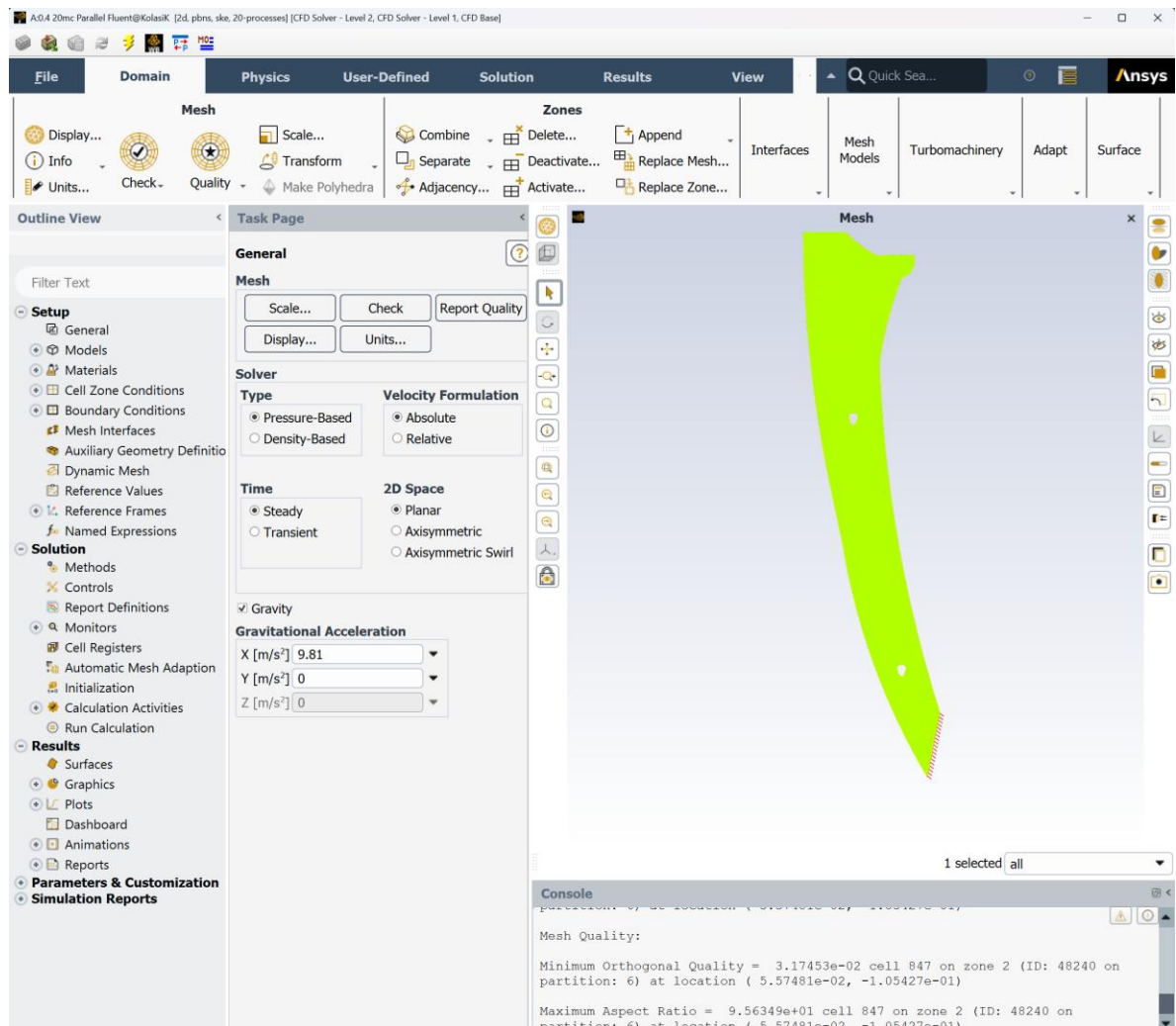


Рисунок 2.5 – Конфігурація базових параметрів вирішувача у середовищі ANSYS Fluent

що відповідає орієнтації геометричної моделі у просторі під час її експорту з CAD-системи. Визначення цих базових налаштувань заклало міцну основу для подальшого вибору специфічних фізичних моделей (моделі турбулентності та багатофазного потоку) у модулі Models.

2.3.5. Вибір фізичних моделей

У модулі налаштувань Models для математичного опису гетерогенної структури потоку активовано багатофазну модель суміші (Mixture). Цей підхід базується на розв'язанні рівнянь збереження для суміші загалом та дозволяє моделювати фази з різними швидкостями руху шляхом розрахунку відносної

швидкості ковзання (Slip Velocity). Для обчислення об'ємних часток застосовано неявну схему дискретизації (Implicit Formulation), що забезпечує стійкість збіжності чисельного алгоритму за наявності значних градієнтів концентрації фаз. Тип міжфазної взаємодії визначено як дисперсний (Dispersed), що повною мірою відповідає фізиці процесу розпилення, де робоча рідина розподілена у вигляді мікрокрапель у суцільному газовому середовищі

.Для моделювання турбулентної в'язкості застосовано модель $k - \omega$ SST (Shear Stress Transport). Вибір цієї моделі зумовлений її гібридною природою: у примежових областях вона використовує рівняння моделі $k - \omega$ для точного опису примежового шару, а у вільному потоці автоматично перемикається на стандартну $k - \varepsilon$ модель. Це гарантує високу точність розрахунків як у зоні прилипання рідини до насінини, так і в ядрі аерозольного струменя.

З метою підвищення точності опису в'язких ефектів активовано опцію корекції для низьких чисел Рейнольдса (Low-Re Corrections), що є критично важливим для коректного моделювання ламінарно-турбулентних переходів та загасання турбулентності поблизу твердих стінок. Додатково задіяно обмежувач генерації турбулентної кінетичної енергії (Production Limiter), який запобігає виникненню нефізичних піків турбулентності в точках гальмування потоку (stagnation points). Опції моделювання переходу (Transition Model) та демпфування турбулентності (Turbulence Damping) у цій постановці не застосовувалися.

Обґрунтований вибір комплексу фізичних моделей (рис. 2.6) дозволяє адекватно відтворити складну гідродинаміку процесу інокуляції, враховуючи багатозфазну структуру потоку, вплив гравітаційних сил та особливості масопереносу в умовах складної просторової геометрії висівного каналу.

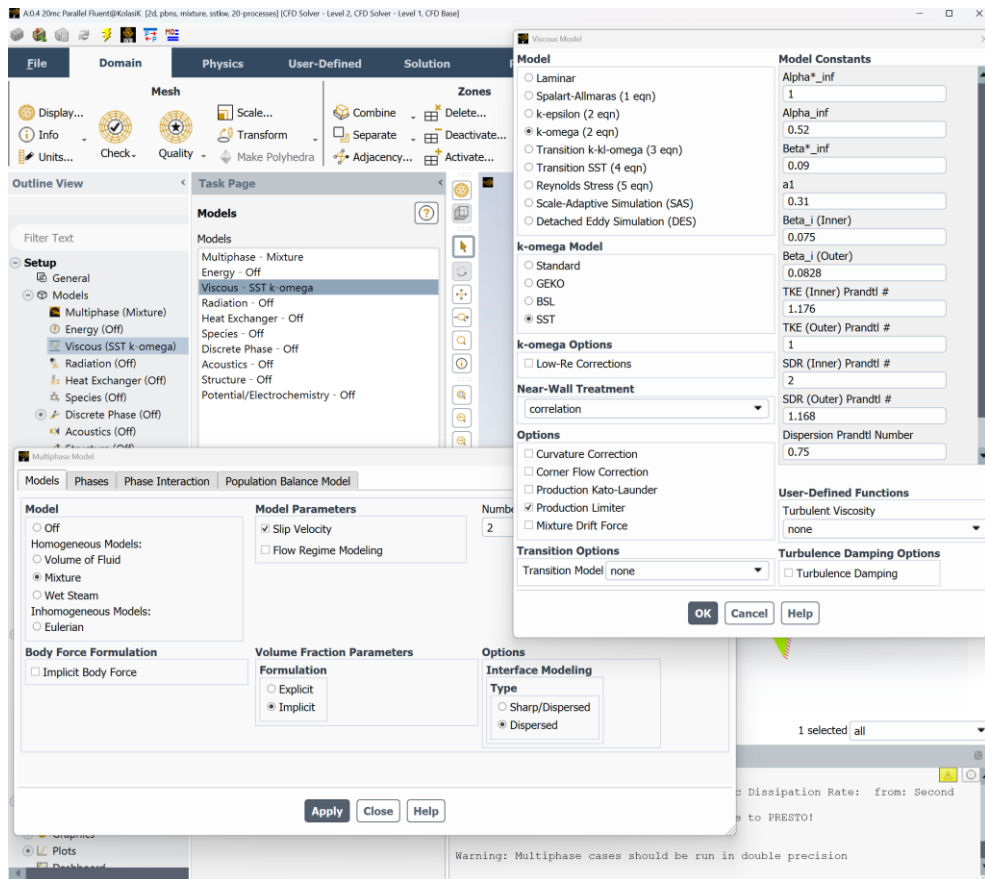


Рисунок 2.6 – Конфігурація фізичних моделей у середовищі ANSYS Fluent

2.3.6. Визначення фізико-механічних властивостей матеріалів

У налаштуваннях розрахункової моделі визначено властивості чотирьох базових матеріалів, що відповідають компонентам багатофазної системи та твердотільним елементам конструкції обладнання.

1. Як робочу рідину обрано воду (water-liquid) зі стандартними параметрами з бібліотеки ANSYS Fluent (густина $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$, динамічна в'язкість $\mu = 0.001 \text{ Па} \cdot \text{с}$).
2. Як газове середовище використано повітря (air) за нормальних умов.
3. Для імітації масо-інерційних та фізичних властивостей насінини використано матеріал-аналог з бази даних середовища розробки – деревину (wood-rosewood). Вибір цього матеріалу інженерно обґрунтований близькістю його масової густини до середньої густини насінини кукурудзи. Це є достатньою умовою для коректного розрахунку гідродинамічної взаємодії фаз

та кінематики зіткнення без урахування складної внутрішньої пористості біологічного об'єкта.

4. Фізико-механічні властивості стінок висівної трубки задано відповідно до характеристик ABS-пластику (plastic-abs), що повністю ідентично матеріалу натурального зразка робочого органу.

2.3.7 Задання граничних та початкових умов обчислювальної моделі

Для замикання системи диференціальних гідродинамічних рівнянь було задано граничні умови (Boundary Conditions) на поверхнях, що обмежують розрахункову область (рис. 2.7).

Вхідна ділянка (Inlet) сопла форсунки встановлено умову типу Velocity Inlet. Швидкість подачі дисперсної фази задавалася величиною, розрахованою за раніше виведеною аналітичною залежністю (формула 2.1), виходячи з необхідної норми витрати препарату та геометрії вихідного отвору розпилювача.

Для вихідної ділянки (Outlet) застосовано умову Pressure Outlet з нульовим надлишковим статичним тиском ($P_{\text{gauge}} = 0$ Па). Це коректно моделює вільний витік багатофазної суміші у відкриту атмосферу без створення додаткового гідравлічного опору на зрізі насіннепроводу.

Стінки каналу (Wall) висівної трубки задано класичну кінематичну умову непроникності та прилипання (No-Slip Condition), що передбачає нульову швидкість рідини та газу безпосередньо на твердій стінці. Це повністю відповідає реальній фізиці течії в'язких середовищ у трубопроводах.

Поверхня насінини (Seed_wall) інтегрована в робочу зону потоку, та змодельована як тверда перешкода (Wall). Для коректного відтворення процесу інокуляції на цій границі активовано умови змочування, що дозволяє адекватно моделювати ефекти поверхневої адгезії та локального утримання плівки робочої рідини на об'єкті обробки.

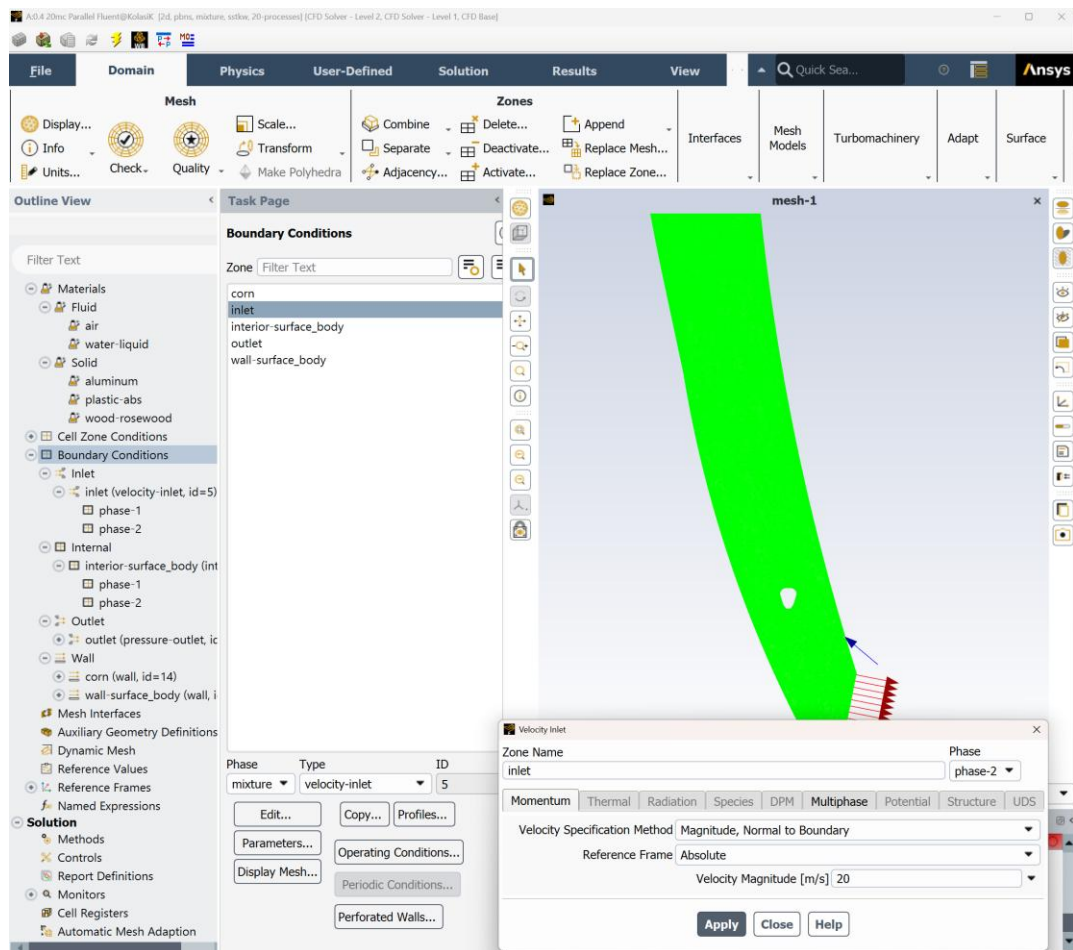


Рисунок 2.7 – Панель конфігурації граничних умов (Boundary Conditions) у середовищі ANSYS Fluent

Початкове математичне наближення розрахункової області (Initialization) для запуску ітераційного алгоритму задавалося з припущенням, що до початку активної інжекції весь внутрішній об'єм висівної трубки заповнений виключно газовою фазою у стані кінематичного спокою ($v = 0$ м/с).

2.3.8. Обґрунтування вибору методів чисельного розв'язання

Вибір чисельних схем у модулі Solution Methods (рис. 2.8) здійснювався з метою забезпечення стійкості ітераційного процесу та мінімізації похибки дискретизації, що є критичним для коректного моделювання багатофазних потоків у каналах складної просторової конфігурації.

Для розв'язання системи осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса (RANS) обрано повністю зв'язану схему Coupled (Pressure-Velocity Coupling). На відміну від розділених методів (наприклад, SIMPLE чи PISO), цей алгоритм передбачає одночасне розв'язання рівнянь збереження імпульсу та нерозривності потоку. Такий підхід, попри вищі витрати оперативної пам'яті, забезпечує значно кращу збіжність розрахунку в умовах інтенсивної взаємодії полів тиску та швидкості, характерної для процесів розпилення. Для запобігання виникненню нефізичних осциляцій тиску задіяно стандартний алгоритм інтерполяції потоків імпульсу Rhie-Chow.

Параметри просторової дискретизації (Spatial Discretization) налаштовано за такою логікою:

1. Використано метод найменших квадратів по комірках (Least Squares Cell Based). Цей метод є оптимальним для неструктурованих тетраедричних сіток, оскільки забезпечує високу точність обчислення градієнтів на елементах із нерегулярною топологією.

2. Застосовано схему другого порядку точності (Second Order), що дозволяє детально відтворити локальні перепади тиску в зоні соплового отвору та навколо поверхні насінини.

3. Для дискретизації конвективних членів рівнянь використано двоетапну стратегію. На початковій стадії розрахунку (продемонстровано на рис. 2.8) застосовувалася схема першого порядку проти потоку (First Order Upwind) для забезпечення стійкості та швидкого згладжування початкових нев'язок. Для отримання фінальних результатів здійснювалося перемикання на схему другого порядку (Second Order Upwind). Це дозволило мінімізувати чисельну дифузію та суттєво підвищити точність моделювання.

Для рівнянь перенесення характеристик турбулентності та питомої швидкості застосовано аналогічний підхід із кінцевим переходом на схеми вищого (другого) порядку, що є необхідною умовою для коректного відтворення вихрових структур в аеродинамічному сліді за насінинною.

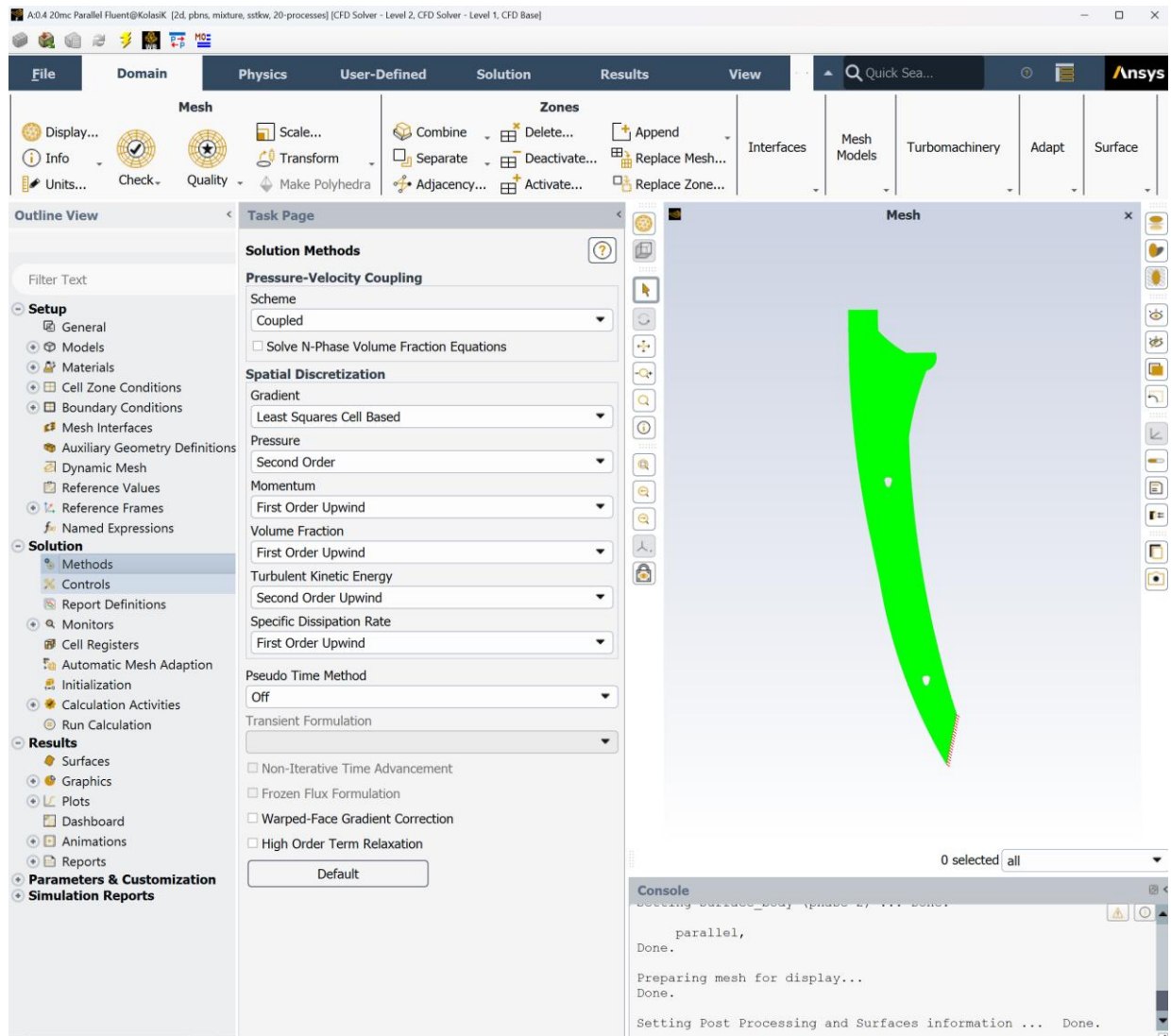


Рисунок 2.8 – Налаштування методів чисельного розв’язання у середовищі ANSYS Fluent

Метод псевдочасового кроку (Pseudo Transient) у даній постановці було деактивовано (Off), оскільки алгоритм Coupled самостійно забезпечує достатню стабільність стаціонарного розв’язку. Додаткові опції корекції градієнтів (Warped-Face Gradient Correction) не використовувалися завдяки високій ортогональній якості побудованої розрахункової сітки.

Обрана конфігурація методів розв’язання забезпечує раціональний баланс між обчислювальною стійкістю ітераційного алгоритму та точністю інженерного аналізу багатофазних гідродинамічних процесів.

2.3.9. Налаштування параметрів вирішувача та критерії

Після дискретизації рівнянь та вибору методів розв'язання завершальним етапом передобробки у середовищі ANSYS Fluent є конфігурація модуля Run Calculation. Коректність налаштувань цього етапу є критичною для забезпечення стійкості ітераційного процесу та мінімізації похибки обчислень.

Перед ініціалізацією розрахунку проведено верифікацію налаштувань моделі за допомогою функції Check Case. Ця процедура дозволила підтвердити валідність заданих граничних умов, узгодженість фізичних субмоделей та топологічну відповідність розрахункової сітки. Такий контроль є обов'язковим етапом, що унеможливорює виникнення сингулярностей та артефактів у процесі чисельного інтегрування. Для виконання розрахунку в стаціонарній постановці встановлено ліміт у 500 ітерацій, що є достатнім для досягнення критеріїв збіжності та виходу інтегральних характеристик потоку на асимптотичні значення.

Крок звітності (Reporting Interval) встановлено на рівні 1 ітерації, що забезпечує детальний моніторинг нев'язок (residuals) рівнянь нерозривності, імпульсу та турбулентності. Оновлення полів розрахункових величин також здійснюється покроково, що дозволяє оперативно діагностувати можливі осциляції розв'язку. Оскільки дослідження проводилося у стаціонарному наближенні (Steady State), опція Data Sampling for Steady Statistics не задіювалася. Ініціалізація розрахунку виконувалася після фінальної перевірки параметрів релаксації та схем дискретизації. Обрана стратегія забезпечує баланс між точністю отриманих даних та витратами машинного часу, що є стандартом для інженерного аналізу гідродинаміки у проточних частинах технологічного обладнання.

2.3.10. Методика обробки та аналіз результатів моделювання

Після досягнення збіжності чисельного розв'язку подальшу роботу зосереджено на постпроцесингу отриманих даних у модулі Results (ANSYS CFD-Post / Fluent Post-processing). Основною метою цього етапу стала кількісна оцінка ефективності інокуляції, яка визначалася через масу робочої рідини, що утримується на поверхні насінини внаслідок кінематичної та адгезійної взаємодії.

Алгоритм визначення маси покриття базувався на аналізі полів об'ємної частки дисперсної фази (Volume Fraction) у межах примежового шару насінини, згідно з обраною багатофазною моделлю Mixture. Розрахунок об'єму рідини V виконано шляхом поверхневого інтегрування товщини плівки по всій площі змочування об'єкта. Перерахунок об'ємних показників у масові m здійснено з урахуванням густини робочого розчину ρ .

Візуалізація результатів (рис. 2.9) за допомогою контурних карт векторних полів швидкості (Velocity Magnitude) дозволила ідентифікувати зони аеродинамічного затінення за насіниною, де відбувається інтенсивне осадження крапель (див. Додаток В). Подальший аналіз контурів розподілу фаз дав змогу виявити ділянки з "тіньовим" ефектом, де товщина плівки рідини є мінімальною. Достовірність отриманих даних підтверджується стабільністю залишків (residuals) та відсутністю ознак розбіжності чисельного алгоритму.

За результатами серії чисельних експериментів встановлено, що визначальними факторами впливу на якість покриття насінини є робочий тиск нагнітання препарату P та діаметр вихідного отвору сопла d . Варіювання цих параметрів у моделі дозволило встановити їх оптимальне співвідношення, за якого досягається нормативна маса нанесеного препарату при мінімізації непродуктивних втрат робочого розчину.

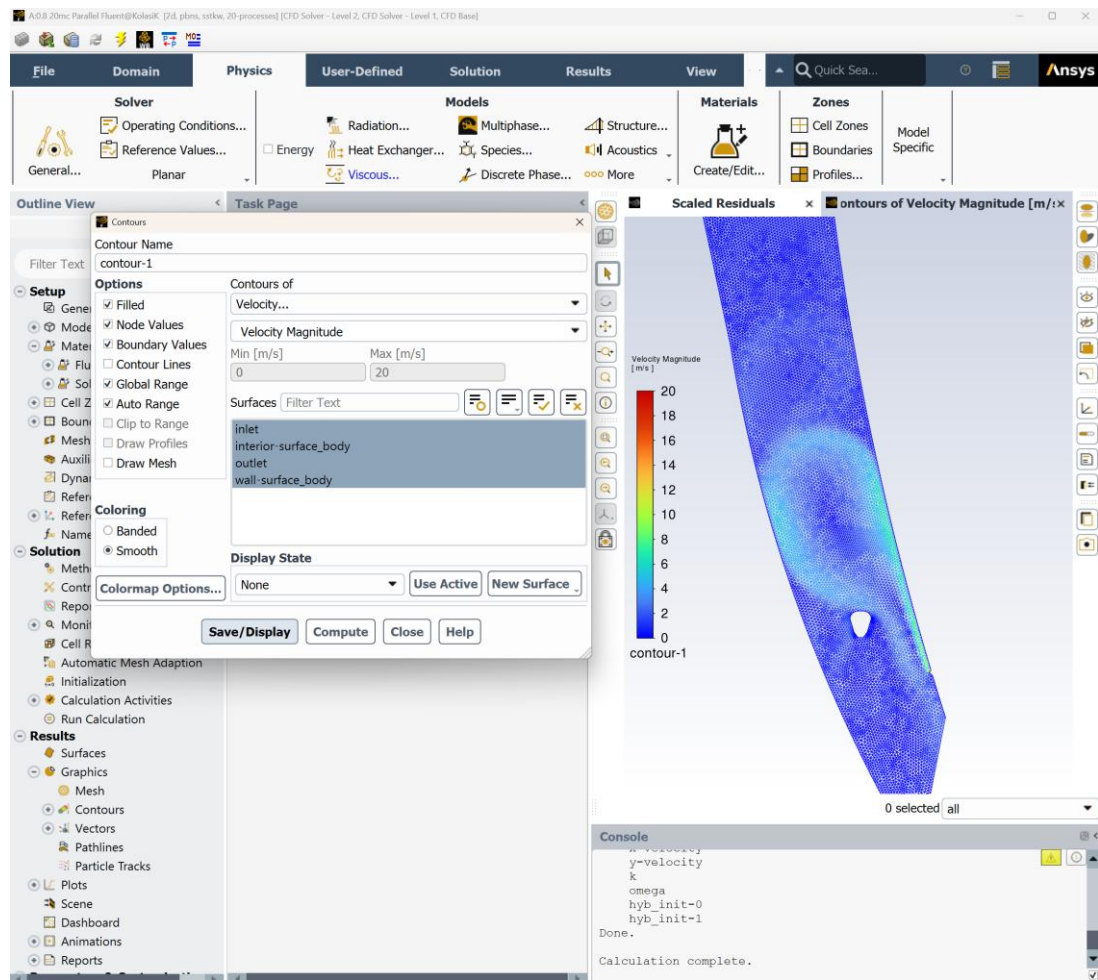


Рисунок 2.9 – Візуалізація поля швидкостей потоку та формування аеродинамічного сліду за об'єктом обробки

2.4. Аналіз результатів імітаційного моделювання

За результатами аналітичних та чисельних розрахунків встановлено, що визначальний вплив на якість покриття насінини робочою рідиною мають два конструктивно-режимні параметри а саме тиск подачі та діаметр вихідного отвору форсунки. Обґрунтування раціонального співвідношення цих параметрів дозволяє забезпечити нормативну рівномірність нанесення препарату. Визначений режим роботи гарантує максимальну ефективність інокуляції за мінімальних втрат робочого розчину, що створює передумови для ресурсозбереження та зниження собівартості технологічного процесу.

Для опису взаємозв'язку між основними параметрами процесу використовується аналітична залежність (формула 2.3), що базується на

фундаментальних законах гідродинаміки. Теоретичний аналіз демонструє загальну тенденцію, підвищення тиску призводить до зростання швидкості витікання рідини, що, у свою чергу, спричиняє збільшення об'ємної витрати. Аналогічно, збільшення прохідного перерізу сопла призводить до підвищення кількості рідини, що надходить у зону обробки.

На основі даних, отриманих у ході чисельного експерименту в середовищі ANSYS Fluent, побудовано графічні залежності (Рис 2.10), що відображають зміну витрати робочої рідини залежно від тиску нагнітання в діапазоні від 0,1 до 0,7 МПа для різних діаметрів соплового отвору. Отримані криві підтверджують закономірний зростаючий характер залежності витрати від тиску.

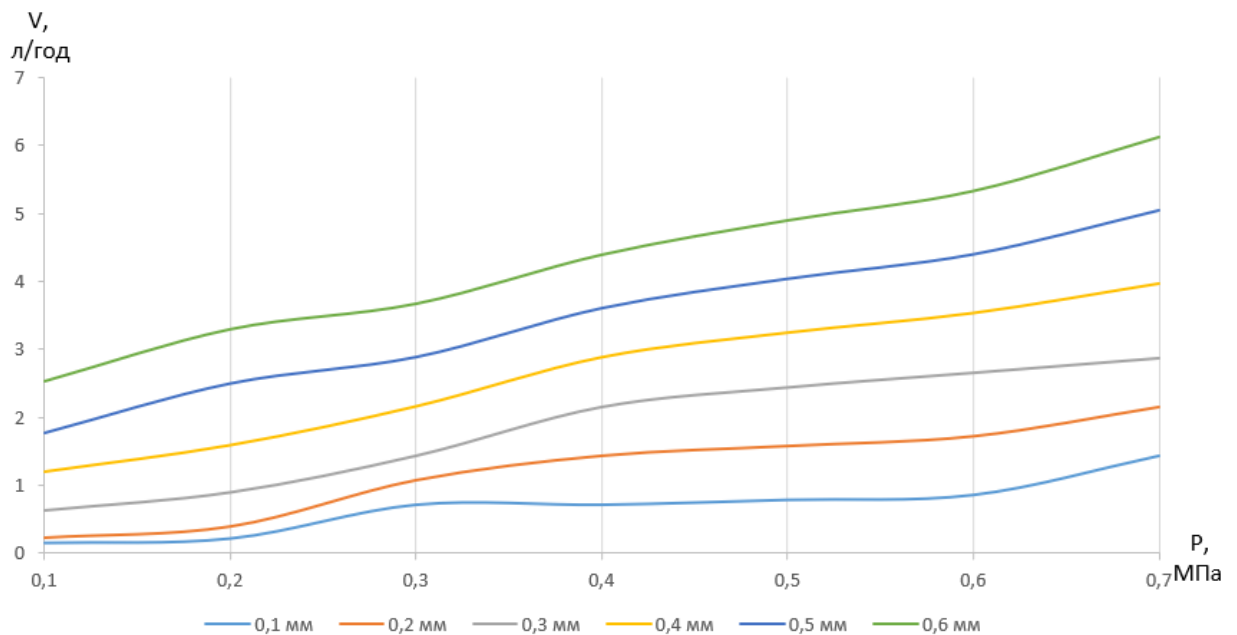


Рисунок 2.10 – Залежність об'ємної витрати робочої рідини від тиску нагнітання для різних діаметрів сопла

Водночас динаміка цього зростання є нелінійною, у зв'язку з чим увесь діапазон тисків доцільно розділити на три характерні зони:

У діапазоні низького тиску (0,1 - 0,3 МПа) спостерігається незначний приріст витрати робочої рідини. Така динаміка зумовлена недостатнім перепадом тиску для забезпечення ефективної диспергації струменя. У цьому режимі домінуючим фактором енергетичних втрат є подолання внутрішнього

гідравлічного опору каналу форсунки, що лімітує швидкість витoku та сповільнює формування розвиненого факела розпилення. Зазначена закономірність найбільш характерна для сопел малого діаметра (0,1 - 0,2 мм), де вплив в'язкого тертя на стінках каналу є критичним.

Середній діапазон тисків (0,3 - 0,6 МПа). У цьому інтервалі фіксується найбільш інтенсивне зростання витрати. Криві набувають стрімкого характеру, що свідчить про вихід форсунки на номінальний робочий режим. Енергії потоку в цій зоні достатньо не лише для компенсації гідравлічних втрат, але й для стабільного утворення дрібнодисперсного аерозольного факела. Навіть незначне варіювання тиску призводить до суттєвої зміни об'єму рідини, що проходить крізь сопло.

В області високого тиску (0,7 МПа) крива зростає більш плавно, демонструючи тенденцію до насичення. Це явище зумовлене наближенням гідравлічного каналу форсунки до межі своєї пропускної здатності. Подальше збільшення тиску вже не забезпечує пропорційного зростання витрати, оскільки частина енергії втрачається на турбулентні пульсації та локальні завихрення всередині соплового каналу. Для отворів великого діаметра ефект насичення проявляється слабше, проте загальна закономірність зберігається для всіх варіантів дослідження.

Результати аналізу графічних залежностей (рис. 2.11), отриманих на основі чисельного CFD-моделювання, підтверджують фізичну вірогідність обраного математичного підходу та прийнятих теоретичних припущень. Встановлено, що отримані дані повною мірою відображають закономірності формування та осадження дисперсного потоку в робочому каналі висівної трубки. Загальною закономірністю для всіх досліджуваних варіантів є нелінійний характер накопичення робочої рідини на поверхні об'єкта, що обумовлено зміною динамічних характеристик факела розпилення залежно від геометричних параметрів сопла.

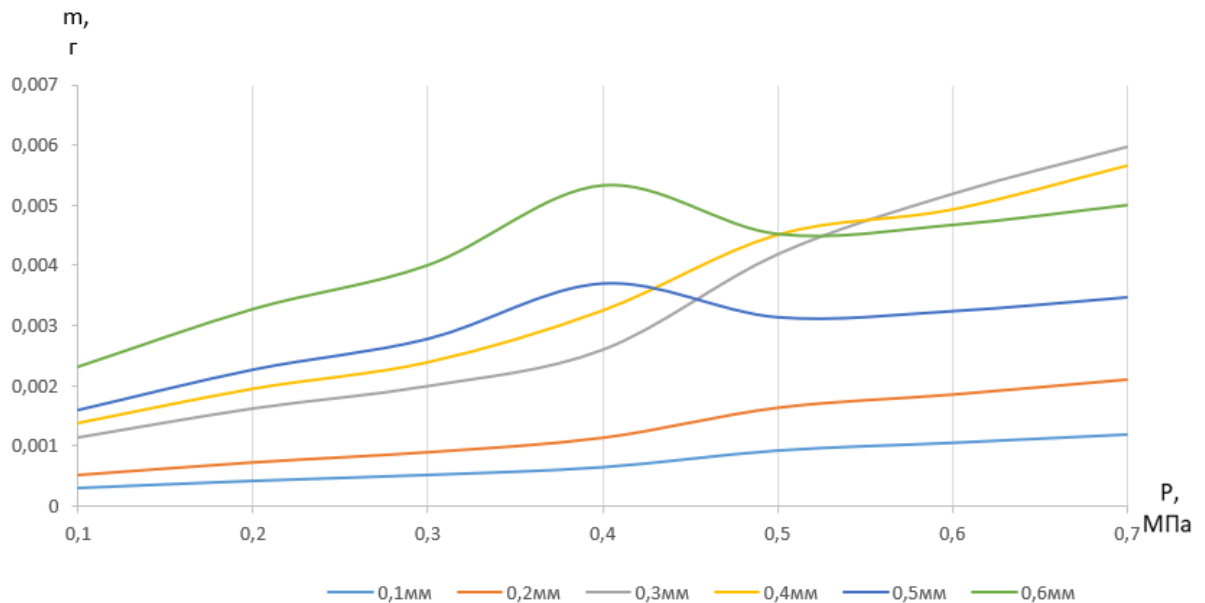


Рисунок 2.11 – Залежність маси утриманої рідини від гідродинамічних параметрів розпилювачів різного діаметра

Детальний аналіз отриманих кривих дозволяє класифікувати робочі процеси за трьома характерними зонами:

В діапазоні малих діаметрів (0,1 – 0,2 мм) характеризується мінімальними показниками масового утримання рідини на насінині. Низька технологічна ефективність зумовлена дрібнодисперсною структурою розпилення, за якої мікрокраплі мають недостатню кінетичну енергію для подолання аеродинамічного опору повітряного середовища. Це призводить до винесення значної частини препарату за межі цільової зони контакту. Залежність у цьому діапазоні має стабільний квазілінійний монотонний характер.

В свою чергу діапазон середніх діаметрів (0,3 – 0,4 мм) Демонструє оптимальний режим міжфазної взаємодії. Отримані криві показують інтенсивну, але стабільну динаміку накопичення маси без різких провалів. Це вказує на досягнення раціонального балансу між інерційними силами крапель, необхідними для їх пробивної дії та доставки до твердої поверхні, і силами поверхневого натягу, що забезпечують адгезію та подальше стабільне утримання рідини. За таких умов ефективність інокуляції має високі та

стабільні показники.

Діапазон великих діаметрів (0,5 – 0,6 мм) прослідковується складна немонотонна динаміка гідродинамічного процесу. Попри високі абсолютні значення витрати на початкових етапах та наявність чітко вираженого локального максимуму подальше підвищення енергії нагнітання призводить до різкого зниження маси утриманого препарату. Вказане явище пояснюється формуванням крупнокраплинного спектра, що рухається з високою швидкістю, погіршують умови адгезії та спричиняють непродуктивні втрати робочого розчину внаслідок ефекту пружного відскоку та гравітаційного стікання з поверхні під дією надмірного ударного імпульсу.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що ефективність інокуляції залежить насамперед від кінематики нанесення препарату безпосередньо всередині висівного апарату. Встановлено, що головним критерієм якості робочого процесу є не стільки абсолютний об'єм поданого розчину, скільки енергетика його розподілу, яка гарантує стабільну адгезію рідини до твердої поверхні насінини без зриву плівки.

Для досягнення нормативної якості покриття визначено раціональні параметри роботи пневмогідравлічної системи: робочий тиск у межах 0,3-0,5 МПа та діаметр сопла розпилювача 0,3-0,4 мм. Обґрунтовані конструктивно-режимні параметри забезпечують прецизійність роботи висівного комплексу та повністю відповідають сучасним технологічним регламентам виробників біопрепаратів таким як [14] щодо передпосівної обробки насінневого матеріалу.

Для проведення інженерних розрахунків як фізичний об'єкт обробки прийнято насіння кукурудзи гібрид «Хемінгвей ЕС» із масою тисячі насінин $m_{1000}=350\text{г}$. Вибір зумовлений використанням саме цього насінневого матеріалу як еталонного в подальших лабораторних та польових дослідках.

Як дисперсну фазу прийнято біопрепарат виробництва «БТУ-Центр». Відповідно до регламенту застосування [143], рекомендована доза чистого препарату становить 2-3 л/т. У даному дослідженні об'єм бакової суміші не

приймався як жорстко фіксована величина. Ступінь розведення концентрату водою визначався виходячи з витратних характеристик форсунки. Пропорція компонентів робочого розчину розраховувалася таким чином, щоб за наявної витрати розпилювача на поверхні насінини гарантовано фіксувалася регламентована кількість діючої речовини.

На основі розробленого підходу, використовуючи аналітичну залежність (формула 2.28), визначено необхідну питому масу препарату на одну насінину, що забезпечує доставку цільової дози інокулянту.

$$m_{1шт} = \frac{Q \cdot \rho \cdot m_{1000}}{10^6}, \quad (2.28)$$

де $m_{1шт}$ – питома маса інокулянту на одну насінину, г;

Q – витрата на тонну, л/т;

ρ – густина речовини, кг/л;

m_{1000} – маса 1000 насінин, г.

На (рис. 2.12) представлено узагальнену номограму робочого процесу, побудовану за результатами чисельного CFD-моделювання. Вона ілюструє взаємозв'язок між гідравлічними характеристиками форсунки та параметрами якості дозування для різних діаметрів соплових отворів від 0,15 до 0,60 мм. Графічна залежність побудована в системі координат, де центральна вісь ординат відображає робочий тиск у гідросистемі в діапазоні 0,1-0,7 МПа, а вісь абсцис має білатеральну структуру. Ліва шкала абсцис характеризує масу утриманої рідини на одній насінині, тоді як права шкала показує питому об'ємну витрату робочої рідини.

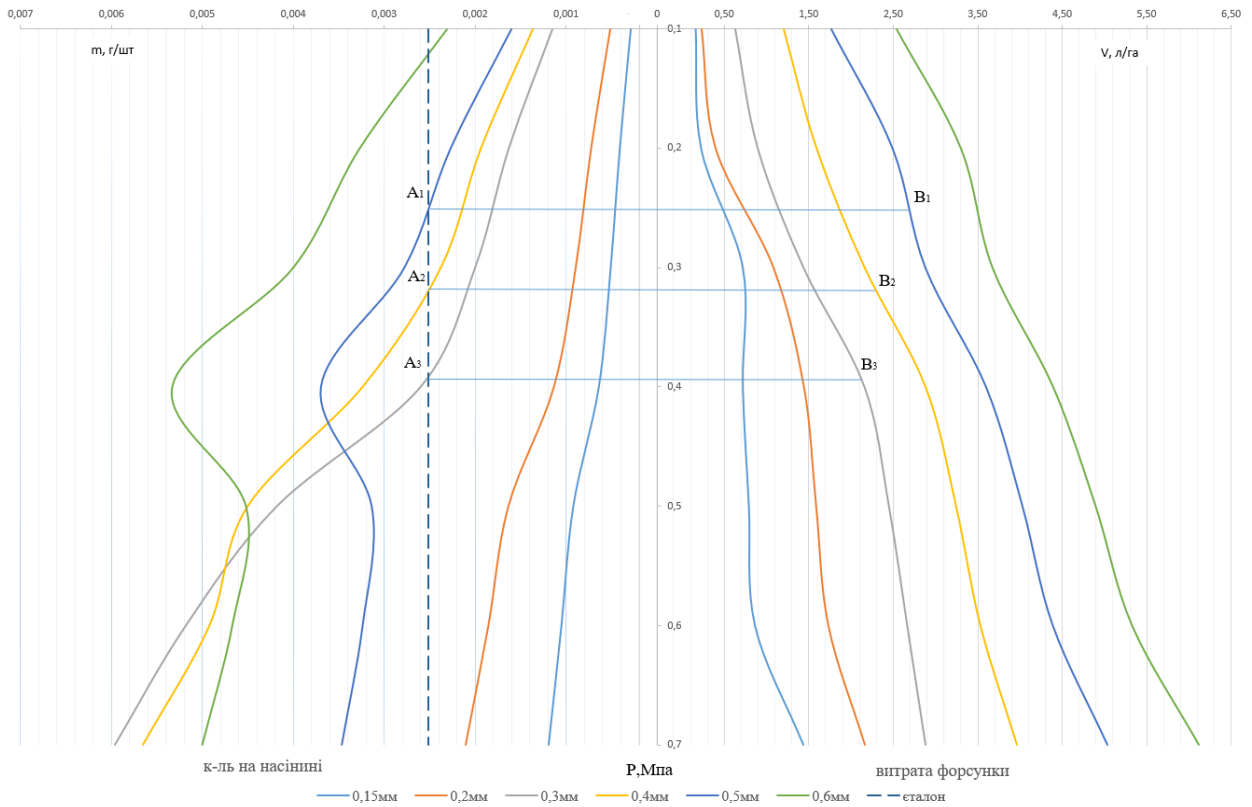


Рисунок 2.12 – Номограма конструктивно-режимних параметрів пневмогідравлічної системи за критеріями кількості покриття та ресурсозбереження

Для визначення допустимих режимів роботи на лівій частині графіка нанесено вертикальну пунктирну лінію, що відповідає еталонному рівню покриття ($m_{1шт} = 0,00252$ г), яку розраховано за формулою (формула 2.28). Ця лінія слугує пороговим критерієм агротехнічної ефективності та дозволяє виключити з розгляду неефективні варіанти. Зокрема, аналіз показує, що форсунки з малими діаметрами сопел 0,15 та 0,20 мм не досягають еталонної лінії у всьому досліджуваному діапазоні тисків, а отже, не здатні забезпечити доставку регламентованої дози препарату. Водночас форсунка з найбільшим діаметром 0,60 мм, хоча й забезпечує необхідне покриття, характеризується надмірно високою витратою рідини, що призводить до значних непродуктивних втрат.

У подальшому аналізі розглядалися лише діаметри 0,30, 0,40 та 0,50 мм, динамічні характеристики яких перетинають лінію еталонного мінімуму у точках A_3 , A_2 та A_1 відповідно. Проекція цих точок перетину на праву частину

номограми на точки B_3 , B_2 та B_1 дала змогу кількісно оцінити питому витрату робочої рідини для кожного з допустимих варіантів. Порівняння отриманих значень свідчить, що варіант із діаметром 0,5 мм (точка B_1) потребує максимальної витрати понад 2,7 л/га при тиску близько 0,25 МПа, тоді як варіант 0,4 мм (точка B_2) займає проміжне положення. Натомість точка B_3 , що відповідає діаметру 0,3 мм, демонструє найменшу витрату рідини на рівні 2,15 л/га при робочому тиску близько 0,39 МПа.

Керуючись інженерним критерієм ресурсозбереження, що передбачає мінімізацію норми виліву при безумовному дотриманні вимог до маси препарату на об'єкті, найбільш прийнятним режимом визначено роботу розпилювача з діаметром сопла 0,3 мм. За таких умов забезпечується утримання цільової речовини на рівні 0,00252 г/шт при мінімальній питомій витраті рідини 2,15 л/га. Дане співвідношення конструктивно-режимних параметрів математично обґрунтовано як раціональне, оскільки воно гарантує виконання технологічних нормативів при мінімально можливих витратах препарату та води для досліджуваної конфігурації висівного обладнання.

2.5. Оптимізація конструктивно-режимних параметрів пневмогідравлічної системи

Визначення раціональних режимів роботи розробленої системи інокуляції вимагає розв'язання комплексної задачі пошуку компромісу між технологічною ефективністю обробки насіння та економічністю використання ресурсів. На основі попередньо встановлених аналітичних залежностей та результатів CFD-моделювання було сформульовано задачу нелінійної математичної оптимізації, яка дозволяє перейти від емпіричного підбору параметрів до їх науково обґрунтованого синтезу. Вихідні дані, змінні та обмеження моделі, представлені у розрахунковій матриці (табл. 2.1), формують систему рівнянь та нерівностей, що описують фізику робочого процесу у висівному каналі.

Як цільову функцію, що підлягає мінімізації, обрано сумарну питому витрату робочої рідини (Z). Цей показник виступає інтегральним критерієм економічної ефективності, оскільки його зменшення безпосередньо корелює зі зниженням собівартості технологічної операції та мінімізацією екологічного навантаження на ґрунт внаслідок непродуктивного стікання надлишків препарату. Математична постановка задачі передбачає пошук глобального мінімуму цієї функції у багатовимірному просторі керуючих змінних. Оптимізаційними параметрами, що варіюються в ході розрахунку, визначено робочий тиск у гідравлічній системі та діаметр соплового отвору розпилювача.

Область допустимих рішень обмежується системою технологічних та конструктивних лімітів. Зокрема, діапазон варіювання тиску встановлено в межах від 0,2 до 0,6 МПа, що продиктовано технічними характеристиками насосного обладнання та умовами стабільного дрібнодисперсного розпилу. Діаметр сопла обмежено інтервалом від 0,2 до 0,5 мм, що відповідає стандартному ряду типорозмірів промислових форсунок. Ключовим обмеженням моделі, яке гарантує технологічну якість процесу, є умова щодо мінімальної маси активної речовини на поверхні насінини. Розрахунковий алгоритм відкидає будь-які комбінації параметрів, за яких фактичне покриття є меншим за обґрунтований еталонний мінімум ($R_6 = 0,0025\text{г}$).

Для забезпечення достовірності розрахунків модель враховує ряд сталих теплофізичних та геометричних параметрів системи, густину робочої рідини, тривалість циклу вприску та площу міделевого перерізу об'єкта обробки. Особливої уваги заслуговує ефективність осідання та прилипання робочої рідини, розрахунок якого виконувався за виведеною раніше аналітичною залежністю (формула 2.26).

Таким чином, сформульована математична модель дозволяє знайти такий вектор конструктивно-режимних параметрів, який забезпечує безумовне виконання технологічних нормативів щодо якості інокуляції при найменшій можливій витраті ресурсів, що і є критерієм раціональності проєктованої машини.

Таблиця 2.1 – Параметри оптимізаційної моделі робочого процесу

п.п.	Назва величини	Одиниці	Позначення	Значення	Пимітка
1	Відклик				
2	Витрата рідини	л/год	Z	1,64	Формула 2.3
3	Змінні величини				
4	Тиск в системі	МПа		0,4	
5	Діаметр сопла	мм		0,3	
6	Обмеження				
7	Мін значення тиску	МПа	R1	0,2	
8	Макс значення тиску	МПа	R2	0,6	
9	Мін значення діаметру	мм	R3	0,2	
10	Макс значення діаметру	мм	R4	0,5	
11	Покриття насіння	г	R5	0,00252	Формула 2.26
12	Мін значення покриття	г/шт	R6	0,0025	
13	Сталі величини				
14	Коефіцієнт розпилу форсунки		μ	0,7	
15	Тривлість вприску	с	t	0,13	
16	Густина рідини	кг/м ³	ρ	1003	
17	Площа перерізу насіння	мм ²	S _{нас}	320	
18	Площа висівної труби	мм ²	S _{тр}	436000	
19	Коефіцієнт ефективності		η_{oc}	0,17	

У результаті чисельного розв'язання сформульованої задачі нелінійної оптимізації методом узагальненого зниженого градієнта було отримано вектор конструктивно-режимних параметрів, що відповідає глобальному мінімуму цільової функції. Розрахунок показав, що за умови дотримання всіх технологічних обмежень найменша витрата робочої рідини досягається при тиску в системі $P = 0,4$ МПа та діаметрі соплового отвору $d = 0,3$ мм. За таких налаштувань сумарна витрата рідини Z становить 1,64 л/год, що є мінімальним показником для даної конфігурації обладнання.

Варто відзначити, що отримане розрахункове значення маси покриття

насінини становить 0,00252 г, що точно відповідає нижній межі встановленого обмеження (R_6). Це свідчить про те, що оптимізаційний алгоритм знайшов рішення на межі допустимої області, що є характерним для задач мінімізації витрат. Система прагне зменшити подачу рідини рівно настільки, щоб лише задовольнити вимогу щодо якості покриття, не витрачаючи жодного зайвого міліграма препарату. Таким чином, параметри $P = 0,4$ МПа та $d = 0,3$ мм визначено як раціональні, оскільки вони забезпечують гарантовану біологічну ефективність інокуляції при найвищій економічності процесу. Отримані дані слугують основою для налаштування режимів роботи експериментального зразка інокуляційного модуля.

Висновки до розділу 2

1. На основі аналізу технологічних вимог встановлено, що для забезпечення необхідної дисперсності крапель та їх рівномірного розподілу по поверхні насінневого матеріалу доцільним є використання щілинних розпилювачів, що працюють у діапазоні низького тиску. Це дозволяє мінімізувати знесення робочої рідини та забезпечити стабільність факела розпилення в обмеженому просторі насінневої трубки.

2. Створено аналітичний апарат, що описує просторово-часову динаміку руху багатофазного потоку під час припосівної інокуляції. Модель враховує взаємозв'язок між гідравлічними параметрами форсунки, кінематикою вільного падіння насінини та механізмом адгезії крапель, що дозволило формалізувати математичні умови ефективного нанесення препарату.

3. З використанням методу скінченних об'ємів (FVM) у програмному середовищі ANSYS Fluent досліджено просторову гідродинаміку процесу впорскування. Це дозволило отримати кількісні дані про розподіл полів швидкостей і тиску, а також визначити механізм взаємодії дискретної фази із поверхнею твердого тіла. Встановлено критичні фактори впливу на ефективність процесу, зокрема нелінійний характер залежності маси

утриманої рідини від енергетики потоку та діаметра сопла.

4. На основі чисельних розрахунків побудовано узагальнену номограму, яка графічно відображає залежність ефективності інокуляції від конструктивно-режимних параметрів пневмогідравлічної системи. Цей інструмент дозволяє оперативно визначати раціональні режими роботи обладнання для забезпечення еталонного рівня покриття за умови мінімізації витрати робочого розчину.

5. Шляхом розв'язання задачі нелінійної оптимізації визначено раціональні параметри функціонування системи. Доведено, що для заданої умови маси 1000 насінин – 350 г, найефективнішим є режим роботи при тиску 0,4 МПа з використанням сопла діаметром 0,3 мм. Зазначена комбінація забезпечує нанесення на одну насінину оптимальної дози інокулянту на рівні 0,00252 г при мінімальній питомій витраті рідини 2,15 л/га, що підтверджує можливість ресурсозбереження при дотриманні жорстких агротехнічних вимог.

6. Урахування у вихідних умовах моделювання комплексу масо-інерційних характеристик посівного матеріалу та реологічних властивостей інокулянту стало підґрунтям для високої точності виконаних гідродинамічних розрахунків. Отримані результати підтверджують інженерну ефективність застосованого методологічного підходу у визначенні конструктивно-режимних параметрів що гарантують мінімізацію непродуктивних втрат препарату при безумовному дотриманні технологічних регламентів щодо якості покриття насіння. Вони є теоретичною базою для подальшого проектування лабораторного стенда та проведення польових експериментів.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Цей розділ дисертаційної роботи присвячено детальному опису умов, матеріалів та методів, використаних під час проведення лабораторних досліджень. Основною метою експериментального етапу є верифікація результатів чисельного моделювання, виконаного у другому розділі, та встановлення емпіричних залежностей процесу інокуляції.

Для підтвердження адекватності розробленої CFD-моделі було реалізовано серію лабораторних дослідів у контрольованих умовах, що дозволило відтворити фізичні параметри процесу з високою точністю. Отримані експериментальні дані щодо маси рідини, утриманої на поверхні насінини, слугували базисом для оцінки похибки моделювання. Порівняння чисельних прогнозів із фактичними результатами дало змогу уточнити граничні умови та підвищити точність прогнозування взаємодії крапель із біологічним об'єктом.

Результати лабораторних досліджень стали основою для остаточного обґрунтування раціональних режимів інокуляції (тиску подачі та діаметра соплового отвору), які гарантують дотримання технологічних вимог щодо дозування активної речовини при мінімізації втрат робочого розчину.

3.1. Програма експериментальних досліджень

Мета досліджень:

- отримання експериментальних (дослідних) даних у відповідності до умов експлуатації для проведення наступних аналітичних розрахунків;
- визначення залежностей зміни техніко-експлуатаційних показників (P і d) та режимів їх роботи, які застосовуються при інокуляції посівного матеріалу;

– проведення досліджень моделі з метою встановлення значень та уточнення теоретичних положень щодо ефективності нанесення інокулянту на посівний матеріал.

Експериментальні дослідження направлені на досягнення визначеної мети та реалізації поставлених завдань. Для ефективної роботи дослідження поділялися на лабораторні та польові випробування.

Під час проведення лабораторних та польових випробувань порушень агротехнічних вимог до проведення сівби кукурудзи не виявлено.

3.2. Методика експериментальних досліджень

3.2.1. Методика лабораторних досліджень

3.2.1.1. Обґрунтування вибору модельної робочої рідини

Відповідно до нормативної документації, робочий розчин для інокуляції готується шляхом розведення концентрованого біопрепарату водою. Для визначення можливості заміни реального препарату його фізичним аналогом на етапі гідравлічних випробувань було проведено порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей чистої води та підготовленої бакової суміші (з концентрацією інокулянту 20% за об'ємом).

Встановлено, що додавання інокулянту в зазначеній пропорції не чинить статистично значущого впливу на базові фізичні властивості рідини. Зокрема, лабораторні вимірювання показали, що густина чистої води становить $\rho_v = 997 \text{ кг/м}^3$, тоді як густина утвореного робочого розчину дорівнює $\rho_p = 1003 \text{ кг/м}^3$ (рис. 3.1). Відносне відхилення показників становить лише 0,6 %, що знаходиться в межах допустимої похибки вимірювальних приладів. Це експериментально підтверджує правомірність використання гідродинамічних характеристик води як еталонного середовища під час попереднього чисельного CFD-моделювання робочих процесів.



Рисунок 3.1 – Лабораторне визначення фізичних властивостей рідин

3.2.1.2. Характеристика експериментальної установки

Експериментальні дослідження проводилися на базі Сумського національного аграрного університету з використанням спеціально розробленого лабораторного стенду. Конструкцію висівного модуля спроектовано у середовищі CAD-моделювання SolidWorks, а виготовлення корпусних деталей реалізовано методом адитивних технологій (FDM-друк) на 3D-принтері Flying Bear Ghost 5 із використанням пластику ABS, стійкого до вологи. Загальний вигляд виготовленої експериментальної установки представлено на (рис. 3.2)

Гідравлічна схема стенду (рис. 3.3) включає резервуар (1) для робочої рідини, з'єднаний магістральним трубопроводом (2) із системою нагнітання.



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд лабораторної установки для дослідження процесу інокуляції

Для захисту компонентів та очищення рідини в лінії встановлено запірний кран (3) і фільтр грубої очистки (4). Подача робочого розчину під тиском забезпечується мембранним насосом (5) (модель Good PUMPs, 12V, 72W), який дозволяє підтримувати стабільний тиск у діапазоні низьких витрат. Моніторинг тиску в системі здійснюється комбінованим методом за допомогою електронного датчика тиску (7) (0-1.2 МПа) для реєстрації даних та контрольного механічного манометра (6). Керування дискретною подачею

рідини (впорскуванням) реалізовано через швидкодіючий електромагнітний клапан (8). Виконавчий орган – форсунка (9) – вмонтована у стінку висівної трубки під кутом 17° відносно горизонтальної площини. Така просторова орієнтація, забезпечує розпилення факела безпосередньо в зону траєкторії падіння насіння. Детальний опис стенду наведено у роботі [96].

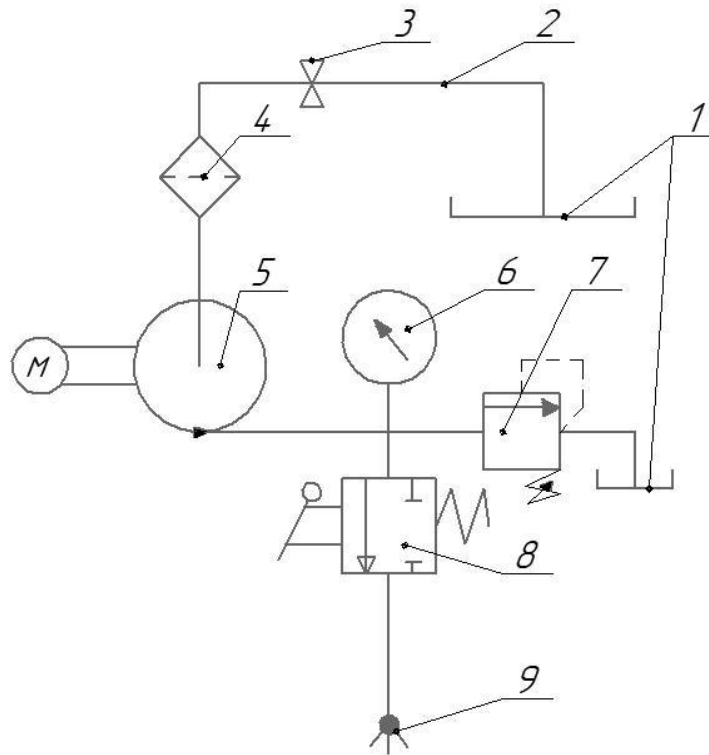


Рисунок 3.3 – Схема підключення компонентів у системі припосівної інокуляції: 1 – резервуар; 2 – трубопроводи; 3 – запобіжний кран; 4 – фільтр; 5 – насос; 6 – манометр; 7 – датчик тиску; 8 – електромагнітний клапан; 9 – форсунка.

Для забезпечення необхідної дисперсності розпилення у дослідженні використано дрібнодисперсні форсунки серії TW (моделі 6020, 6030, 6040, 6050), методика вибору яких описана (у підрозділі 2.1 обґрунтування вибору форсунки). Конструкція форсунки (рис. 3.4) складається з корпусу (1), антикрапельного клапана (2), пружини (3) та спеціального сердечника-турбулізатора (4). Розпилювач (5) працює в тандемі з сердечником, що забезпечує формування стабільного конусного факела. Зміна витратних

характеристик та дисперсності крапель досягалося шляхом фізичної заміни сопел різного діаметра та регулювання робочого тиску в системі.

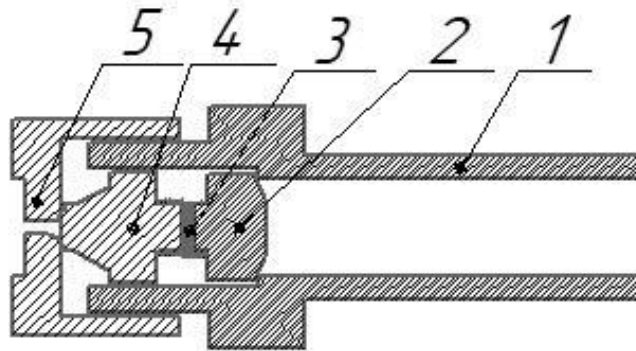


Рисунок 3.4 – Будова форсунки, схематичне зображення: 1 – корпус;
2 – антикрапельний клапан; 3 – пружина; 4 – сердечник-турбулізатор;
5 – розпилювач.

3.2.1.3. Методика проведення експериментальних досліджень

Для дослідження впливу конструктивно-режимних параметрів на якість інокуляції реалізовано дво-факторний експеримент. Схема досліду передбачала варіювання двох незалежних факторів: тиску робочої рідини (Фактор А) та діаметра вихідного отвору сопла (Фактор Б). Рівні варіювання факторів наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Схема повного факторного експерименту

Показник	Рівні варіювання факторів
Фактор А: Тиск у системі (P), МПа	0,3; 0,4; 0,5; 0,6
Фактор Б: Діаметр сопла (d), мм	0,2; 0,3; 0,4; 0,5

Методика проведення досліду передбачала наступну послідовність операцій. Після заповнення резервуара чистою водою за допомогою електронного регулятора встановлювали заданий рівень тиску, контроль стабільності якого здійснювали за манометром. Після виходу гідравлічної системи на робочий режим ініціювали обертання висівного диска, що

забезпечувало дозовану подачу посівного матеріалу. Процес впорскування було синхронізовано з рухом об'єктів: у момент проходження насінини крізь канал висівної трубки її присутність фіксувалася оптичним датчиком. Сигнал від датчика активував електромагнітний клапан, який забезпечував миттєву подачу робочої рідини до форсунки для здійснення інокуляції.

В якості об'єкта обробки використовували наважку насіння кукурудзи гібриду «Хемінгвей ЄС» (Lidea) у кількості 1000 шт. Перед кожним дослідом проводили точне зважування сухої проби на лабораторних вагах Radwag WLC 0.2/C/1 (клас точності II, дискретність 0,001 г). Хоча номінальна маса 1000 насінин становить 350 г, фактична маса визначалася індивідуально для кожної повторності. Процес імітації висіву полягав у пропусканні насіння крізь зону дрібнодисперсного розпилу форсунки у висівній трубці з подальшим збором у накопичувальну ємність.

Для визначення масового балансу виконували роздільне зважування обробленого насіння (для фіксації маси утриманої рідини) та залишків рідини, що стекла зі стінок трубки. Кожна дослідна точка це комбінація факторів Р та d відпрацьовувалася у 10-кратній повторності для забезпечення статистичної достовірності результатів.

3.2.1.4. Методика обробки та аналізу результатів

Інтерпретація отриманих даних базувалася на порівнянні фактичної маси рідини, зафіксованої на насініні, з розрахунковим нормативом. Визначення еталонної (теоретично необхідної) маси інокулянту на одну насініну M_{opt} проводили, виходячи з рекомендованої норми внесення препарату, за формулою (3.1):

$$M_{opt} = \frac{x_1 \cdot a}{b}, \quad (3.1)$$

де x_1 – оптимальна норма робочого розчину за рекомендаціями виробника на 1000 насінин, г;

a – норма робочого розчину на 1 т посівного матеріалу, г;

b – кількість насінин у 1 т, шт.

Кількість насінин у 1 тонні розраховували на основі фактичної маси тисячі насінин (m_{1000}) за залежністю (3.2):

$$b = \frac{10^6}{m_{1000}}, \quad (3.2)$$

де b – кількість насінин у тонні, шт;

m_{1000} – фактична маса 1000 насінин, г.

Отримане значення M_{opt} слугувало базовим критерієм оцінки ефективності. Відхилення фактично отриманих експериментальних показників від розрахункового M_{opt} дозволяло зробити висновок про придатність конкретної комбінації тиску та діаметра сопла для забезпечення якісного процесу інокуляції.

3.2.2. Методика польових досліджень

3.2.2.1. Оцінка ґрунтово-кліматичних умов та місця проведення досліджень

Експериментальні дослідження проводилися на полях Науково-навчального виробничий комплекс (ННВК) Сумського національного аграрного університету, розташованого в північно-східній частині Лісостепу України. Для сівби кукурудзи у 2024 році було обрано ділянку, сертифіковану згідно зі стандартами «Органік Стандарт». Поле захищене лісосмугою, що мінімізує вплив вітрової ерозії.

Дослідна ділянка характеризується переважно рівнинним рельєфом із незначним схилом східної експозиції, що впливає на загальний водний режим.

Характерною особливістю мікрорельєфу поля є наявність лінійного зниження шириною близько 2 м, що простягається у меридіональному напрямку (з півночі на південь). Така конфігурація зумовлює специфіку поверхневого стоку: талі та дощові води частково акумулюються в зоні зниження, створюючи умови підвищеного зволоження, що може виступати фактором неоднорідності врожайності.

Ґрунтовий покрив дослідної ділянки представлений чорноземом типовим слабовилугованим, що свідчить про помірний ступінь вимивання солей і карбонатів у профілі ґрунту. За вмістом органічної речовини ґрунт належить до малогумусних, а за механічним складом – до середньосуглинкових. Материнською породою є лес, який зумовлює формування сприятливих фізико-механічних властивостей ґрунту, зокрема оптимальної пористості, достатньої водопроникності та стійкості до ущільнення під дією ходових систем сільськогосподарських машин.

Відповідно до результатів агрохімічного аналізу ґрунту лабораторія Agrii, (рис. 3.5), реакція ґрунтового розчину є слабокислою ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 6,35$; $\text{pH}_{\text{KCl}} = 5,56$), що є сприятливим середовищем для функціонування мікроорганізмів інокулянтів та не обмежує ефективність технологічних процесів передпосівної обробки і сівби.

Механічний склад ґрунту характеризується вмістом фізичної глини на рівні близько 30 %, що забезпечує задовільну водоутримувальну здатність та стабільний водно-повітряний режим. З точки зору експлуатації посівних машин та агрегатів це сприяє формуванню рівномірного насінневого ложа, зменшенню нерівномірності загортання насіння та стабільній роботі робочих органів за змінних умов зволоження.

Вміст органічного вуглецю становить 1,6 %, що дозволяє класифікувати ґрунт як малогумусний. Знижений рівень гумусу є нетиповим для чорноземів даного регіону та свідчить про деградаційні процеси, які можуть впливати на зміну фізико-механічних властивостей ґрунту, зокрема його структурність і опір різанню. Це обґрунтовує доцільність застосування технологічних рішень,

спрямованих на підвищення ефективності використання біологічних препаратів і мікроелементів під час сівби.

За забезпеченістю елементами живлення ґрунт характеризується підвищеним вмістом рухомих форм фосфору та обмінного калію, що створює сприятливі умови для початкового росту рослин. Забезпеченість мінеральним азотом, кальцієм і марганцем є середньою. Лімітуючими факторами родючості виступає низький вміст сірки, магнію та мікроелементів (Zn, Cu, B), що обґрунтовує доцільність локального внесення біологічних препаратів і мікродобрив безпосередньо в зоні розміщення насіння за допомогою спеціалізованих інокуляційних та дозувальних систем, інтегрованих у конструкцію посівних машин.

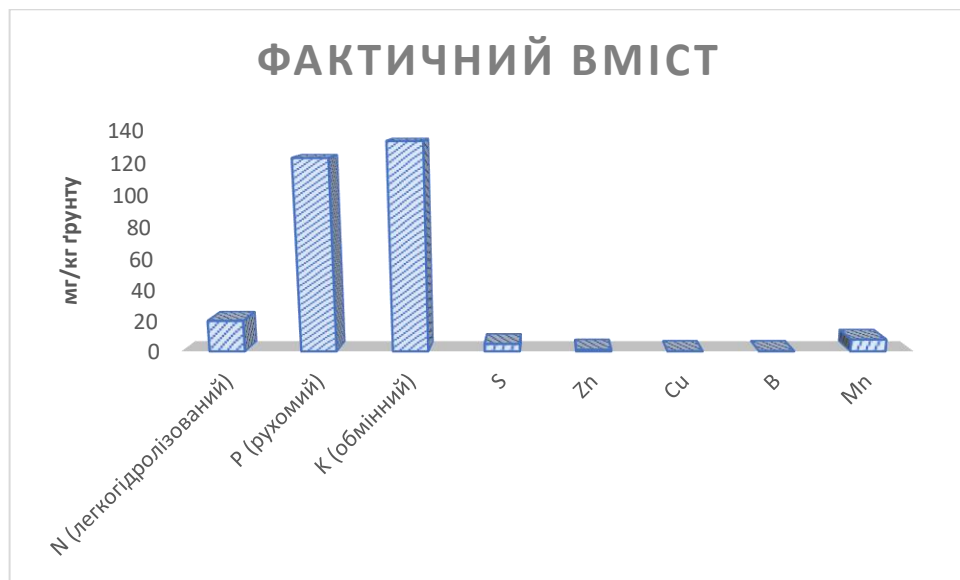


Рисунок 3.5 – Фактичний вміст основних елементів живлення

Вегетаційний період 2024 року характеризувався посушливими умовами (рис. 3.6). Сума опадів за період березень-вересень склала 199 мм, що значно нижче середньорічної норми. Температурний режим був помірно теплим (середній мінімум 3,4° С, середній максимум 22,1°С). Критичним фактором став дефіцит вологи на початку вегетації (травень), що ускладнило появу сходів, та у вересні, що вплинуло на наливання зерна. Водночас температурний режим упродовж вегетації відповідав біологічним потребам культури.

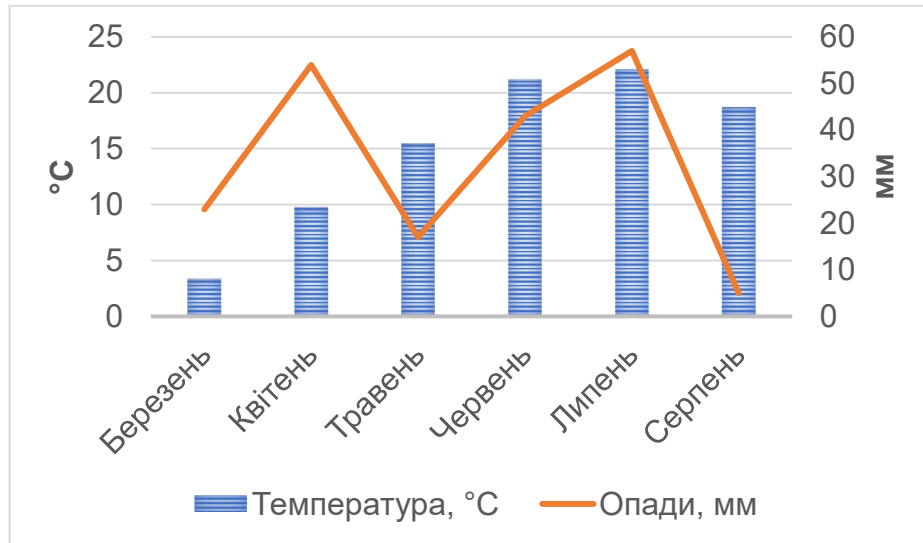


Рисунок 3.6 – Візуалізація метеоданих за 2024 р.

3.2.2.2. Характеристика досліджуваного гібрида та біопрепарату

У досліді використовували середньостиглий гібрид кукурудзи гібриду «Хемінгвей ЄС» (Lidea). Напрямок використання: зерно, силос.

Біологічні особливості гібриду інтенсивного типу він адаптований до умов Лісостепу та Степу. Характеризується посухостійкістю, толерантністю до високих температур та стійкістю до основних хвороб (фузаріоз качана і стебла, пухирчаста та летюча сажки, гельмінтоспоріоз).

Рекомендована густина становить 55-65 тис. рослин/га (в умовах достатнього зволоження). Відзначається високою вологовіддачею при достиганні.

Для інокуляції насіння використовували комплексний біопрепарат «Живе добриво» (БТУ-ЦЕНТР), призначений для передпосівної обробки насіння та позакореневого підживлення.

До препарату входять консорціум корисних мікроорганізмів а саме азотфіксуючі, фосфатмобілізуючі та молочнокислі бактерії, та біологічно активні речовини: фітогормони, вітаміни, амінокислоти. Макро- та мікроелементи.

3.2.2.3. Схема досліду та методика проведення досліджень

Польові дослідження проводились з метою визначення ефективності використання інокулянту у технології вирощування кукурудзи. Закладання дослідів, розміщення ділянок та проведення обліків здійснювали відповідно до методичних рекомендацій [154]. Схема досліду передбачала варіанти обробки згідно з (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Схема проведення досліду

Площа облікової ділянки: 1120 м² (довжина 100 м, ширина 11,2 м). Захисні смуги: 2 м. Попередник: пшениця озима. Обробіток ґрунту: оранка на глибину 25 см. Спосіб сівби: широкорядний (міжряддя 70 см).

Для проведення польових досліджень та здійснення висіву насіння застосовувався машинно-тракторний агрегат у складі трактора МТЗ-82 та пневматичної сівалки точного висіву Vega 8 Profi (виробництва ПАТ «Ельворті»). Базову конструкцію сівалки було додатково модернізовано шляхом інтеграції розробленої експериментальної системи припосівної

інокуляції (рис. 3.8). Розпилюючі форсунки монтувалися безпосередньо у висівних каналах сошників сівалки. Таке конструктивне рішення дозволило здійснювати локальне цілеспрямоване нанесення рідкого інокулянту безпосередньо на насінину в посівній борозні абсолютно синхронно з процесом висіву.



Рисунок 3.8 – Загальний вигляд машинно-тракторного агрегату МТЗ-82 та модернізована сівалка Vega 8 Profi під час закладання польових дослідів

Фенологічні спостереження проводили у ключові фази розвитку (викидання волоті, фізіологічна стиглість). Площу листової поверхні визначали за методом лінійних вимірювань [163] за формулою (3.3):

$$S = k \cdot l \cdot n, \quad (3.3)$$

де S – площа листка, см^2

k – поправочний коефіцієнт (для кукурудзи 0,75);

l – довжина листка, см ;

n – ширина листка у найширшому місці, см [164].

Біометричні показники (висота рослин, висота кріплення качана, діаметр стебла) вимірювали за допомогою мірної лінійки та штангенциркуля [147].

Структуру врожаю визначали у фазі фізіологічної стиглості шляхом відбору модельних снопів (10 типових рослин з ділянки) (рис. 3.9). Визначали довжину та діаметр качана, кількість рядів зерен, кількість зерен у ряду, масу 1000 насінин.



а

б

в

Рисунок 3.9 – Відібрані зразки качанів кукурудзи: а) інокуляція розробленою системою; б) контроль (без обробки); в) традиційний метод.

Облік урожайності проводили методом ручного збирання качанів з облікової ділянки з подальшим зважуванням та перерахунком на стандартну вологість (14%). Вологість зерна контролювали вологоміром «Фауна М».

Вологість ґрунту: термостатно-ваговим методом у шарі 0-100 см [153]. Біологічна активність ґрунту проводилась методом аплікацій (визначення інтенсивності розкладання лляної тканини) у шарі 0-30 см. Експозиція становила 60 діб (рис. 3.10).

Математична обробка отриманих експериментальних результатів реалізована з використанням методів планування повного факторного експерименту та регресійного аналізу. Побудова емпіричних залежностей здійснювалася шляхом апроксимації результатів методом найменших квадратів з наступною перевіркою адекватності математичних моделей за F-

критерієм Фішера та оцінкою точності за коефіцієнтом детермінації R^2 . Статистичну обробку масивів даних, розрахунок параметрів відтворюваності експерименту та графічну інтерпретацію результатів проводили у програмному середовищі MS Excel.



Рисунок 3.10 – Визначення біологічної активності ґрунту методом аплікацій (зразки лляної тканини)

Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано використання води як модельної рідини для проведення комплексу лабораторних досліджень. Експериментально підтверджена ідентичність її фізико-механічних властивостей (відхилення за густиною не перевищує 0,6 %) властивостям 20-відсоткового робочого розчину інокулянту. Це дозволяє забезпечити високу відтворюваність результатів при раціональному використанні біопрепаратів та правомірність застосування гідродинамічних констант води у математичних моделях.

2. Розроблено та виготовлено експериментальний лабораторний стенд,

який дозволяє імітувати технологічний процес припосівної інокуляції безпосередньо у висівній трубці пневматичного апарату. Застосування адитивних технологій (3D-друку) для виготовлення оригінальних вузлів та мікропроцесорних систем електронного регулювання тиску, забезпечує прецизійне налаштування конструктивно-режимних параметрів розпилювальної системи з високим ступенем повторюваності умов досліду.

3. Сформовано програму та методику досліджень на основі повного факторного експерименту, що передбачає вивчення впливу тиску в гідросистемі (0,3–0,6 МПа) та діаметра сопла розпилювачів (0,2–0,5 мм) на якісні показники покриття насіння. Застосування гравіметричного методу з 10-кратною повторністю дослідів та використанням аналітичних ваг із дискретністю 0,001 г гарантує статистичну достовірність даних, необхідну для верифікації розроблених теоретичних моделей.

4. Визначено умови проведення польових досліджень на базі навчально-науково-виробничого центру Сумського національного аграрного університету. Обрана локація за ґрунтово-кліматичними характеристиками є репрезентативною для зони північно-східного Лісостепу України. Для реалізації технології в натурних умовах проведено модернізацію висівного агрегату у складі трактора МТЗ-82 та сівалки Vega 8 Profi шляхом інтеграції розробленого інокуляційного модуля, що дозволяє об'єктивно оцінити експлуатаційну ефективність системи при роботі з гібридами кукурудзи в реальному виробничому циклі.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ РОБОТИ

У цьому розділі наведено результати комплексних лабораторних та натурних польових досліджень, спрямованих на практичну перевірку адекватності розроблених теоретичних CFD-моделей та підтвердження ефективності запропонованих конструктивно-режимних параметрів пневмогідравлічної системи інокуляції.

Структурно етап експериментальних досліджень та їх аналізу поділено на кілька взаємопов'язаних блоків. На першому етапі здійснено порівняльний аналіз теоретичних і емпіричних даних щодо масового осадження робочої рідини на насіннєвий матеріал. За допомогою методів математичної статистики (зокрема F-критерію Фішера) верифіковано адекватність теоретичної моделі та отримано емпіричне поліноміальне рівняння регресії для точного керування процесом дозування препарату.

На наступному етапі наведено результати польових випробувань модернізованого машинно-тракторного агрегату в реальних умовах експлуатації. Оцінено вплив розробленої системи машинного нанесення інокулянту на ключові біометричні показники розвитку рослин та формування кінцевої структури врожайності порівняно з контрольними та традиційними методами обробки.

Завершується розділ комплексним техніко-економічним обґрунтуванням, що доводить фінансову доцільність впровадження розробленого інженерного рішення у реальне сільськогосподарське виробництво завдяки підвищенню врожайності та мінімізації непродуктивних втрат препарату.

4.1. Результати лабораторних досліджень впливу конструктивно-режимних параметрів на якість проведення інокуляції.

Комплекс експериментальних досліджень реалізовано на спеціально виготовленому лабораторному стенді (опис наведено у підрозділі 3.2.1.2. характеристика експериментальної установки), конструкція якого дозволяє імітувати технологічний процес припосівної інокуляції безпосередньо у висівній трубці пневматичного висівного апарату.

Метою цього етапу робіт було експериментальне визначення фактичної маси робочої рідини, що фіксується на поверхні насінин після гідродинамічної взаємодії з аерозольним факелом розпилу, а також встановлення закономірностей зміни технологічних втрат та забезпечення якості нанесення препарату залежно від ключових факторів робочого тиску в гідросистемі (P) та діаметра вихідного отвору розпилювача (d).

Експерименти виконувалися згідно з розробленою методикою повного факторного експерименту, викладеною (у підрозділі 3.2.1.3. Методика проведення експериментальних досліджень) Об'єктом обробки слугувала наважка насіння кукурудзи гібриду «Хемінгвей ЄС» (кількість 1000 шт.). Для імітації робочого розчину інокулянту використано модельну рідину з відповідними фізико-механічними властивостями (густина $\rho \approx 1003 \text{ кг/м}^3$).

Контроль кількісних показників масового покриття насінневого матеріалу здійснювався високоточним гравіметричним методом із застосуванням аналітичних лабораторних ваг Radwag WLC 0.2/C/1 з дискретністю вимірювання 0,001 г.

4.1.1. Аналіз впливу тиску нагнітання на показники маси нанесеного покриття

У ході проведення серії дослідів варіювання робочого тиску здійснювалося в діапазоні 0,2 – 0,5 МПа для кожного типорозміру

досліджуваних розпилювачів. Результати вимірювань маси рідини, зафіксованої на поверхні 1000 насінин, систематизовано в (табл. 4.1). Дані отримані в лабораторії Сумського національного аграрного університету для гібрида кукурудзи «Хемінгуей ЕС».

Таблиця 4.1 – Результати експериментальних досліджень маси нанесеної рідини на 1000 насіння

Діаметр сопла (d), мм	Тиск (P), МПа	Маса сухого насіння, г	Маса обробленого насіння, г	Маса рідини на насінні, г
0,2	0,3	336,451	337,351	0,9
	0,4	343,922	345,062	1,14
	0,5	337,289	338,929	1,64
	0,6	334,176	336,036	1,86
0,3	0,3	338,114	340,114	2
	0,4	346,251	348,851	2,6
	0,5	345,208	349,388	4,18
	0,6	337,944	343,124	5,18
0,4	0,3	341,563	343,943	2,38
	0,4	341,089	344,329	3,24
	0,5	334,895	339,395	4,5
	0,6	335,622	340,542	4,92
0,5	0,3	339,71	342,49	2,78
	0,4	344,815	348,515	3,7
	0,5	342,004	345,144	3,14
	0,6	346,117	349,357	3,24

Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про те, що підвищення робочого тиску зумовлює нелінійний характер зростання маси рідини, що утримується на насінні. Водночас ефективність процесу критично залежить від діаметра сопла, що визначає структуру хмари розпилу.

Зокрема, для розпилювачів з малим діаметром сопла (0,2 мм) маса нанесеної рідини залишається мінімальною (0,90...1,86 г) та недостатньою для досягнення цільового показника у 2,52 г на 1000 насіння. Це підтверджує теоретичні положення про те, що мікрокраплі мають недостатню кінетичну

енергію для подолання аеродинамічного опору у висівній трубці, що призводить до їх знесення супутнім потоком повітря без ефективного контакту з об'єктом обробки.

Натомість використання розпилювачів з діаметром 0,5 мм призводить до надлишкового зволоження та формування крупнокраплинного спектра. Гравіметричний аналіз зафіксував значний об'єм вільної вологи, яка не утримувалася на оболонці насінини, а стікала в нижню частину висівної трубки. Така низька адгезійна здатність зумовлена надмірно високою кінетичною енергією крапель, яка під час удару об поверхню спричиняє пружний відскок або руйнування плівки з подальшим гравітаційним стіканням препарату.

Оптимальна динаміка процесу спостерігалася для форсунок середнього діапазону (0,3 – 0,4 мм). Зростання тиску від 0,3 до 0,5 МПа забезпечує інтенсивне збільшення маси покриття, що стабільно перевищує встановлений поріг біологічної ефективності. Проте подальше нарощування тиску понад 0,5 МПа не дає пропорційного приросту корисної маси через інтенсифікацію ефекту відскоку крапель та їх передчасну коагуляцію на внутрішніх стінках насінневої трубки.

4.1.2. Оцінка технологічних втрат та обґрунтування раціональних режимів

Важливим етапом лабораторних досліджень було визначення обсягу непродуктивних втрат інокулянту. На основі отриманих експериментальних даних побудовано графічну залежність (рис. 4.1), що характеризує ефективність утримання препарату на насінні.

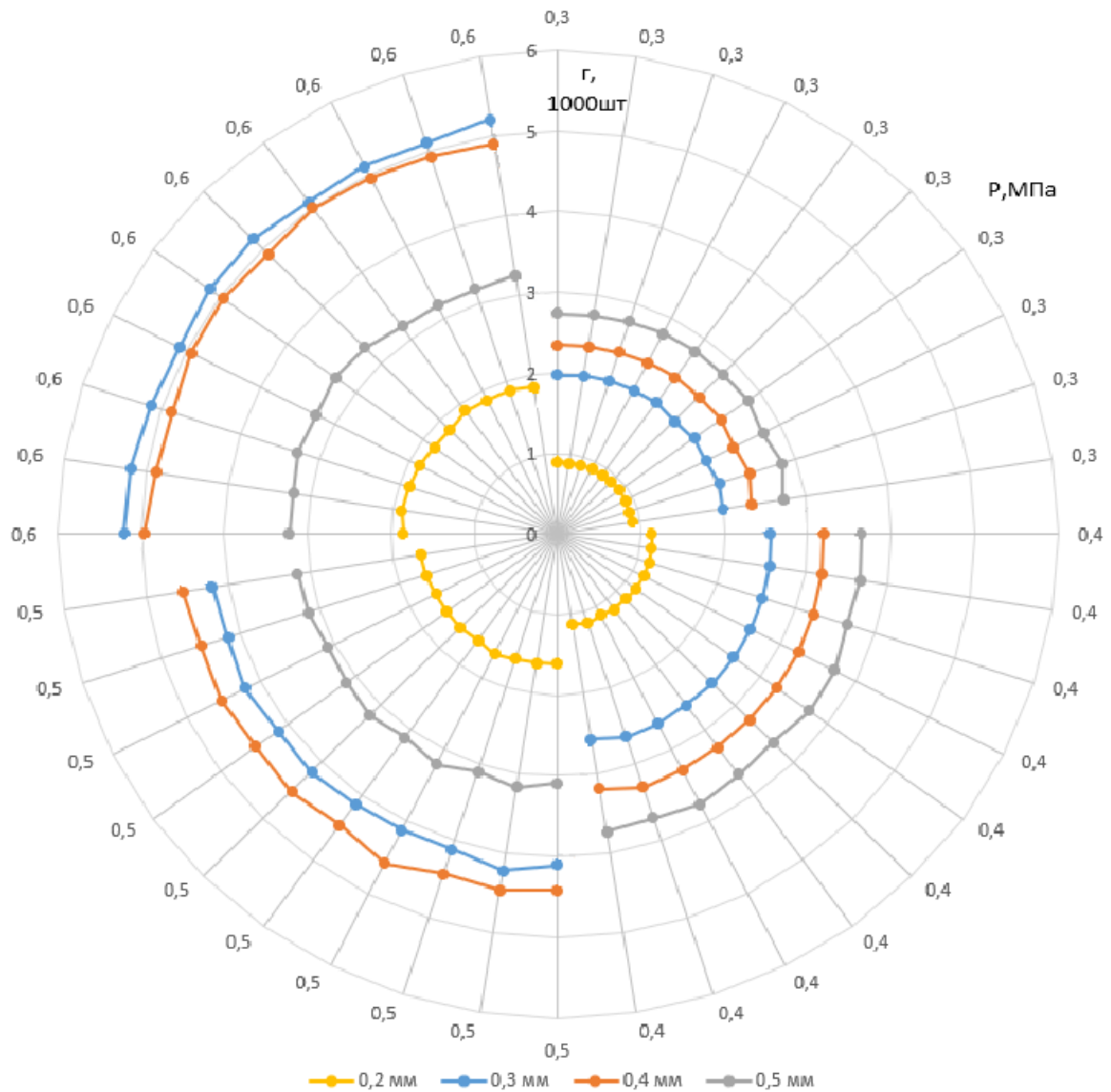


Рисунок 4.1 – Залежність фактичної маси рідини на поверхні насіння від робочого тиску для розпилювачів діаметром 0,2 – 0,5 мм

Візуалізація отриманих результатів дозволяє ідентифікувати межі стабільної роботи гідравлічної системи та визначити область раціональних значень робочих факторів. Графічний аналіз підтверджує, що при використанні розпилювача з діаметром сопла 0,3 мм у діапазоні тиску нагнітання 0,39 - 0,44 МПа забезпечується мінімальний рівень технологічних втрат інокулянту.

У вказаному режимі геометричні та кінематичні характеристики сформованої аерозольної хмари гарантують максимальний ступінь покриття

траєкторії вільного падіння насінини в обмеженому просторі висівної трубки. Це у поєднанні з оптимізованою дисперсністю потоку сприяє миттєвій адгезії препарату до оболонки насінини за рахунок досягнення балансу кінетичної енергії крапель та сил поверхневого натягу.

При експлуатації розпилювачів більшого діаметра та зростанні тиску понад 0,5 МПа спостерігається дестабілізація процесу та стрімке підвищення витрат розчину. Дане явище зумовлене посиленням турбулентності повітряного потоку та інтенсивним осадженням рідини на внутрішніх стінках обладнання внаслідок злиття великих фракцій аерозолю. Вказані закономірності становлять надійне інженерне обґрунтування для забезпечення енерго- та ресурсоощадності розробленого модуля припосівної обробки насіння кукурудзи під час його експлуатації у складі посівного комплексу.

4.2. Перевірка адекватності математичної моделі та апроксимація експериментальних даних

Для наукового обґрунтування параметрів системи припосівної інокуляції (у Розділі 2 моделювання гідродинамічних процесів осадження та утримання інокулянту на поверхні насіння у висівній трубці) було розроблено математичну модель та проведено комплексне чисельне моделювання процесу осадження інокулянту в програмному середовищі ANSYS Fluent із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Ключовим завданням даного підрозділу є підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів та визначення меж їх застосовності.

Верифікація адекватності моделі реалізована шляхом порівняльного аналізу розрахункових значень із даними фізичних лабораторних експериментів, викладених (у підрозділі 4.1 результати лабораторних досліджень впливу конструктивно-режимних параметрів на якість проведення інокуляції) Процес верифікації включає:

- Зіставлення теоретичних та експериментальних кривих розподілу маси

рідини;

- визначення величини відносного відхилення розрахункових даних від фактичних;
- статистичну обробку результатів для оцінки значущості отриманих кореляцій.

4.2.1. Порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних залежностей

Як ключовий критерій верифікації розробленої математичної моделі обрано інтегральний показник ефективності робочого процесу – масу робочої рідини, що фіксується на поверхні насінини, залежно від зміни робочого тиску. На (рис. 4.2) представлено графічну інтерпретацію суміщення теоретичних сімейств кривих, отриманих за результатами чисельного CFD-моделювання у середовищі ANSYS Fluent (суцільні лінії), та експериментальних даних, отриманих у ході фізичних випробувань на лабораторному стенді (маркери).

Графічний аналіз отриманих залежностей дозволяє констатувати високий ступінь адекватності математичного опису реальному фізичному процесу. Характер розташування експериментальних точок повністю узгоджується з теоретично обґрунтованою моделлю, зі зростанням тиску нагнітання спостерігається нелінійна інтенсифікація процесу осадження крапель на поверхні насінини.

Проте при досягненні тиску понад 0,5 МПа темпи приросту маси покриття різко сповільнюються. Це експериментально підтверджує раніше висунуту теоретичну гіпотезу про домінування ефекту пружного відскоку крапель із надмірною кінетичною енергією та їх подальшу коагуляцію на внутрішніх стінках висівної трубки.

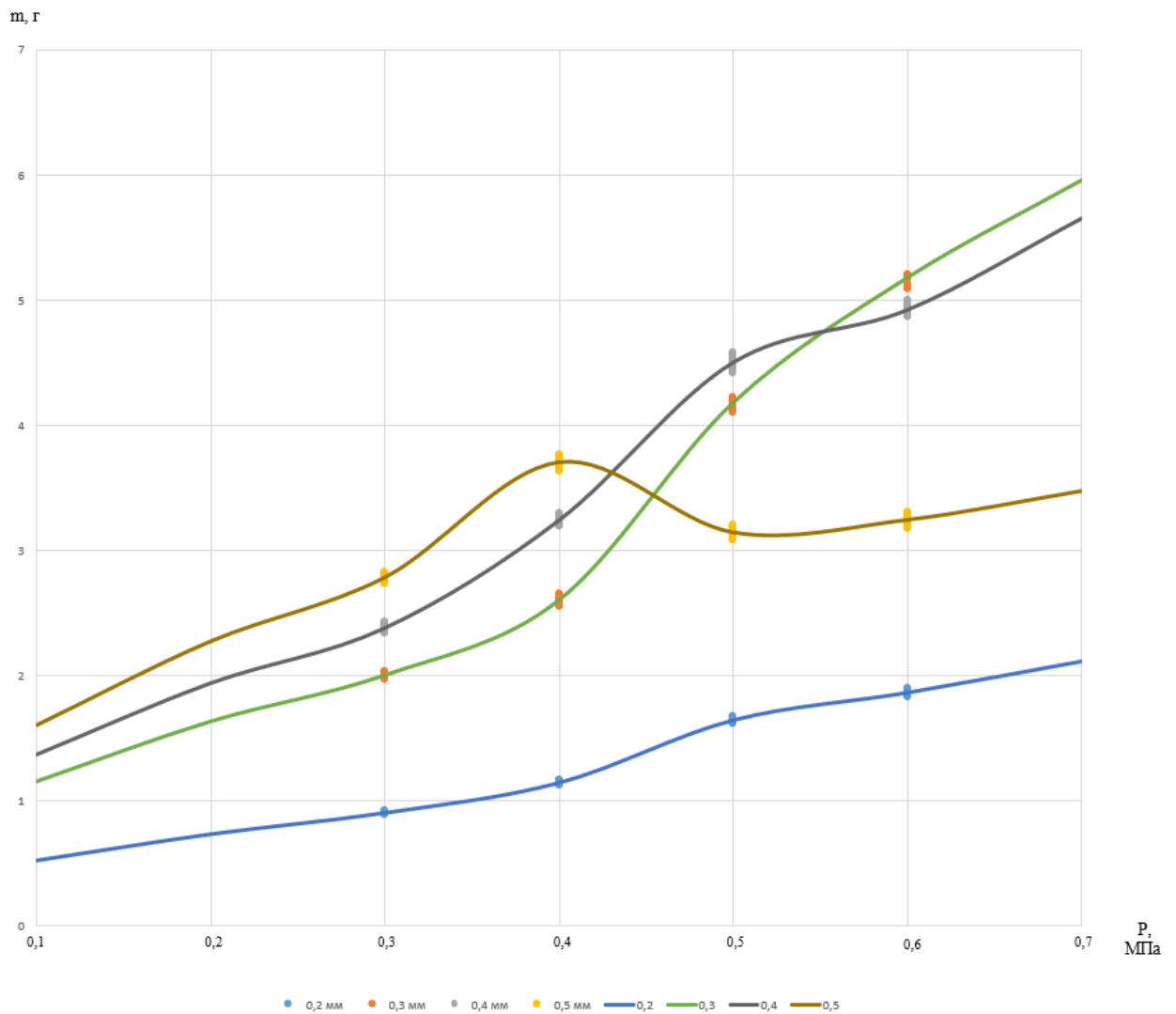


Рисунок 4.2 – Зіставлення теоретичних значень та результатів експерименту щодо накопичення маси інокулянту для розпилювачів різного діаметра

4.2.2. Статистична оцінка адекватності моделі за критерієм Фішера

Для статистичного підтвердження адекватності розробленої математичної моделі використано F-критерій Фішера. Перевірка гіпотези про адекватність виконувалася шляхом порівняння дисперсії адекватності (S_{ad}^2) з дисперсією відтворюваності експерименту (S_0^2).

Дисперсія відтворюваності (S_0^2) характеризує випадковий розкид даних у паралельних дослідах (повторностях) і розраховується за формулою:

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(n-1)}, \quad (4.1)$$

- де y_{ij} – результат j -го вимірювання в i -й точці досліду, г;
 \bar{y}_i – середнє значення маси утриманої рідини в i -й точці, г;
 N – кількість досліджених рівнів тиску;
 n – кількість повторностей досліду (прийнято $n = 10$).

Дисперсія адекватності (S_{ad}^2) характеризує відхилення розрахункових значень моделі (y_{calc}) від середніх експериментальних значень (\bar{y}_i):

$$S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (y_{calc} - \bar{y}_i)^2}{N-k}, \quad (4.2)$$

де k – кількість коефіцієнтів у рівнянні регресії (прийнято $k = 3$, що відповідає поліному другого ступеня).

Розрахункове значення критерію Фішера (F_p) визначається як відношення: $F_p = S_{ad}^2 / S_0^2$. Результати статистичних розрахунків зведено в (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Результати оцінки адекватності моделі за критерієм Фішера

Параметр	Позначення	Значення
Дисперсія адекватності,	S_{ad}^2	0,0325
Дисперсія відтворюваності	S_0^2	0,0114
Розрахункове значення F-критерію,	F_p	2,85
Табличне значення F-критерію (F_{tab}) при $\alpha=0.05$	F_T	4,08

Умовою адекватності математичної моделі є виконання нерівності: $F_p < F_t$. Оскільки для нашого масиву даних ця умова безумовно виконується $2,85 < 4,08$, це підтверджує, що теоретична математична модель, розроблена

у другому розділі дисертації, адекватно описує реальний фізичний процес накопичення інокулянту на поверхні насіння з довірчою ймовірністю $P = 0,95$. Значення дисперсії відтворюваності свідчить про високу стабільність результатів експерименту та належну точність застосованої вимірювальної системи.

4.2.3. Апроксимація експериментальних даних

Виходячи з результатів лабораторних досліджень, для розпилювача з раціональним діаметром сопла $d = 0,3$ мм, який за результатами попереднього чисельного моделювання та стендових випробувань визначено як оптимальний для розробленої технологічної схеми, отримано емпіричне рівняння регресії. Це рівняння апроксимує залежність маси рідинного покриття (m_p , г) від робочого тиску нагнітання (P , МПа). Графічна інтерпретація та трендова лінія представлені на (рис. 4.3).

Аналіз характеру кривої підтверджує, що залежність маси покриття від робочого тиску найбільш достовірно описується поліномом другого ступеня. Використовуючи метод найменших квадратів (МНК), отримано загальний вигляд емпіричного рівняння регресії:

$$m_p = aP^2 + bP + c, \quad (4.3)$$

де m_p – маса утриманої рідини на насінні, г;
 P – робочий тиск у гідросистемі, МПа;
 a, b, c – емпіричні коефіцієнти.

Для раціонального розпилювача з діаметром сопла $d = 0,3$ мм рівняння набуває такого конкретного вигляду:

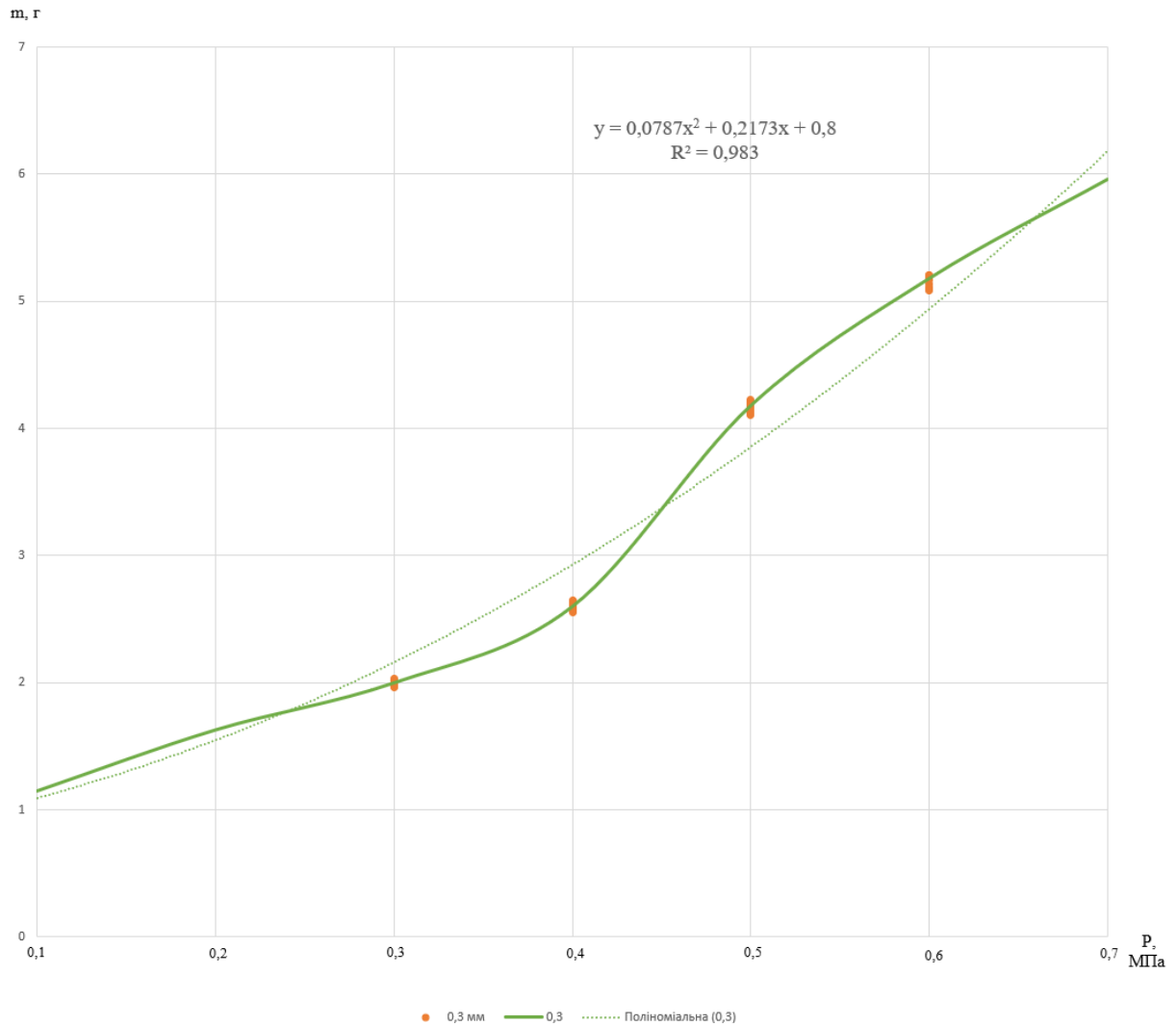


Рисунок 4.3 – Апроксимація експериментальної залежності маси покриття (m_p) від тиску (P) для розпилювача $d = 0,3$ мм

$$m_p = 7.87P^2 + 2.173P + 0.8, \quad (4.4)$$

Висока точність отриманої математичної моделі підтверджується значенням коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,983$. Це переконливо свідчить про те, що понад 98 % варіації маси нанесеного препарату пояснюється зміною тиску в межах обраного режиму роботи. Такий рівень достовірності є цілком достатнім для використання цього рівняння як базового алгоритму для точного програмного керування системою автоматичного дозування інокулянту в реальних польових умовах.

4.3. Результати польових досліджень ефективності функціонування розробленої системи

Після підтвердження адекватності математичної моделі та експериментальної верифікації раціональних параметрів процесу розпилення (робочий тиск $P \approx 0,38 - 0,4$ МПа, діаметр сопла розпилювача $d = 0,3$ мм) було проведено серію натурних польових випробувань. Метою цього етапу було здійснення комплексного порівняльного аналізу агротехнічної та інженерної ефективності трьох варіантів реалізації технології сівби:

1. Контроль (без обробки): висів базового насіннєвого матеріалу без застосування будь-яких біологічних препаратів.

2. Традиційний метод (ручна інокуляція): завчасне механічне змішування насіння з рідким інокулянтом «Живе добриво» (БТУ-ЦЕНТР) у спеціальній тарі безпосередньо перед завантаженням матеріалу в насіннєві бункери сівалки.

3. Інноваційний метод (розробленою системою): цілеспрямоване локальне нанесення інокулянту на насінину безпосередньо у висівній трубці сошника синхронно з процесом висіву за допомогою розробленого інокуляційного модуля.

4.3.1. Порівняльний аналіз біометричних показників рослин

Інтенсивність вегетативного росту рослин на ранніх етапах розвитку є об'єктивним індикатором якості виконання технологічної операції сівби та ефективності взаємодії насіння з біологічним агентом. Результати вимірювань висоти рослин кукурудзи (гібрид «Хемінгвей ЕС») підтвердили суттєвий вплив способу внесення препарату на динаміку їх розвитку (табл. 4.3).

Аналіз даних свідчить, що застосування розробленої системи забезпечує стабільний приріст висоти рослин в середньому на 11,6 % відносно контрольного варіанта. Це зумовлено тим, що за машинної інокуляції

виключається фактор механічного мікротравмування посівного матеріалу, характерний для ручного перемішування, та забезпечується висока рівномірність покриття препаратом безпосередньо перед контактом насінини з ґрунтом.

Таблиця 4.3 – Вплив способу інокуляції на морфометричні параметри рослин

Варіант досліджу	Висота рослин, см	Відхилення від контролю, %
Контроль (без обробки)	224,2	–
Ручна обробка	236,8	+5,6
Інокуляційний модуль	250,2	+11,6

4.3.2. Вплив способу інокуляції на структуру та рівень урожайності

Ключовим показником ефективності інженерної розробки у галузевому машинобудуванні є її здатність забезпечити максимальну збереженість біологічного потенціалу сільськогосподарської культури. Експериментальні дані щодо структури врожайності наведено в (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Порівняльна характеристика врожайності за різних способів інокуляції

Показник	Контроль	Ручна обробка	Інокуляційний модуль
Маса 1000 насінин, г	270,1	285,8	295,2
Урожайність, т/га	6,40	6,80	7
Приріст, т/га	–	+0,4	+0,6
Приріст, %	–	6%	9%

Результати польових випробувань виявили такі закономірності:

– Ручна обробка забезпечила незначне підвищення врожайності (на

0,4 т/га). Цей факт корелює з положеннями (підрозділу 1.2.4. Адаптовані засоби) щодо шкідливого механічного впливу змішувачів на тендітну оболонку насіння, що призводить до зниження польової схожості навіть за умови наявності стимулюючого біопрепарату.

- Машинна інокуляція за допомогою розробленого модуля забезпечила приріст врожайності на рівні 7 т/га (приріст 0,6 т/га до контролю).

Це експериментально доводить, що пропонуваній інокуляційний модуль припосівної інокуляції є технічно досконалішим. Він мінімізує механічні пошкодження насіння, усуває негативний вплив ультрафіолетового випромінювання під час транспортування та забезпечує максимальну життєздатність бактерій інокулянту завдяки їх миттєвій ізоляції в ґрунтового середовищі.

4.4. Економічна ефективність застосування розробленої системи припосівної інокуляції

Економічне обґрунтування доцільності впровадження розробленої пневмогідравлічної системи проводилося шляхом розрахунку додаткового чистого прибутку з одного гектара посівної площі. Розрахунок базується на фактичних витратах на матеріальні ресурси та середньоринковій вартості реалізованої продукції (табл. 4.5).

Структура загальних виробничих витрат для базового (контрольного) варіанта включала прямі експлуатаційні витрати: вартість пально-мастильних матеріалів, закупівлю насінневого матеріалу, заробітну плату механізатора та амортизаційні відрахування базового посівного комплексу. Для варіанта з ручною обробкою додатково враховувалася вартість самого інокулянту та витрати ручної праці на його змішування. Своєю чергою, виробничі витрати під час використання розробленого інокуляційного модуля, окрім вартості препарату, включали додаткові амортизаційні відрахування та витрати на технічне обслуговування змонтованого на сівалці обладнання.

Таблиця 4.5 – Економічні показники впровадження розробленої системи (з розрахунку на 1 га)

Показник	Контроль	Ручна обробка	Інокуляційний модуль
Урожайність, т/га	6,40	6,80	7
Вартість продукції*, грн/га	58 240	61 880	63 700
Витрати на препарат, грн/га	0	840	640
Загальні виробничі витрати, грн/га	29 475	30 315	30 815
Чистий прибуток, грн/га	28 765	31 565	33 085
Економічний ефект до контролю	–	+2 800 грн	+4 320 грн

Порівняльний аналіз економічних показників дозволяє констатувати істотний вплив обраного способу інокуляції насінневого матеріалу на кінцевий рівень урожайності та загальну фінансову результативність вирощування культури.

Встановлено, що застосування ручної обробки насіння, порівняно з контрольним варіантом, забезпечує помірне зростання урожайності до 6,80 т/га та дозволяє досягти певного економічного ефекту. У цьому варіанті чистий прибуток становив 31 565 грн/га, що на 2800 грн/га перевищує показники контролю. Однак така ситуація супроводжується підвищенням загальних виробничих витрат до 30 315 грн/га через значну трудомісткість ручного методу, що в комплексі з ризиками механічного травмування насіння знижує його інвестиційну привабливість.

Водночас використання розробленої системи машинної інокуляції дозволило отримати найбільш високі показники урожайності на рівні 7 т/га, що безпосередньо сприяло пропорційному збільшенню вартості отриманої

валової продукції до 63 700 грн/га. Навіть за умови врахування додаткових капітальних витрат та амортизаційних відрахувань на експлуатацію впровадженого модуля, чистий прибуток зріс до 33 085 грн/га. Це забезпечило отримання додаткового чистого економічного ефекту в розмірі 4 320 грн/га порівняно з контролем, що суттєво перевершує фінансові результати традиційних методів обробки.

Отримані результати натурних досліджень повністю підтверджують техніко-економічну доцільність широкого впровадження розробленої системи інокуляції у виробничий процес. Пропоноване інженерне рішення забезпечує стабільне підвищення врожайності та формування позитивного фінансового результату за рахунок досягнення раціонального балансу між показниками технічної продуктивності машинно-тракторного агрегату та питомими ресурсовитратами на проведення технологічної операції.

Висновки до розділу 4

1. На основі проведених лабораторних та стендових досліджень обґрунтовано раціональні конструктивно-режимні параметри функціонування розробленої системи припосівної інокуляції: робочий тиск у гідросистемі 0,4 МПа та діаметр вихідного отвору розпилювача 0,3 мм. Вказаний режим забезпечує формування оптимальної аерозольної хмари, що гарантує прецизійну фіксацію цільової дози препарату на поверхні насінини (понад 0,0025 г/шт) при мінімальних технологічних втратах робочого розчину.

2. Експериментально підтверджено адекватність розробленої математичної моделі процесу інокуляції насінини у висівній трубці. Розрахункове значення критерію Фішера ($F_p = 2,85$) виявилось меншим за табличне ($F_T = 4,08$), що у поєднанні з високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,983$) свідчить про високу точність прогнозування динаміки осадження рідини в робочій зоні висівної трубки пневматичного апарата.

3. Натурні польові випробування довели технологічну перевагу

впровадженого інокуляційного модуля над традиційними методами передпосівної обробки. Встановлено, що інтеграція даного модуля у конструкцію сівалки дозволяє мінімізувати механічне мікротравмування насіння, що сприяє інтенсифікації вегетативних процесів на ранніх етапах розвитку та збільшенню висоти рослин на 11,6% відносно контрольних показників.

4. Визначено, що застосування розробленого інокуляційного модуля забезпечує стабільний приріст урожайності зерна кукурудзи на рівні 0,60 т/га (досягаючи 7,00 т/га), тоді як традиційна ручна обробка насіннєвого матеріалу через порушення цілісності оболонки забезпечує приріст лише у 0,40 т/га (до 6,80 т/га). Це підтверджує ефективність обраного інженерного рішення для максимальної реалізації біологічного потенціалу культури.

5. Економічне обґрунтування результатів досліджень показало, що впровадження інокуляційного модуля у виробничий процес дозволило отримати додатковий чистий прибуток у розмірі 4 320 грн/га порівняно з базовою технологією без обробки. Отриманий фінансовий ефект повністю демпфує витрати на придбання біопрепаратів та амортизацію додаткового обладнання, забезпечуючи високу експлуатаційну рентабельність та ресурсоощадність розробленого технічного засобу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено нове вирішення актуального науково-прикладного завдання галузевого машинобудування, що полягає у підвищенні ефективності передпосівної обробки насіння біологічними препаратами шляхом обґрунтування параметрів та розробки інокуляційного модуля, який інтегрованої в посівний комплекс.

1. Обґрунтовано обмеженість функціональних можливостей наявних технічних рішень для проведення інокуляції. Встановлено, що існуючі технології завчасної обробки (в шнекових чи барабанних протруювачах) призводять до механічного мікротравмування насіння до 3,0 % та зниження життєздатності мікроорганізмів.

2. Доведено доцільність переходу до технології in-furrow з використанням розробленої конструктивно-технологічної схеми інокуляційного модуля для сівалки Vega 8 Profi, який нівелює розрив у часі між обробкою та потраплянням у ґрунт. Використання дрібнодисперсних форсунок безпосередньо у насіннєпроводі забезпечує надійний захист препарату, рівномірність покриття ($CV < 5\%$) та локальне внесення бактерій у зону проростання.

3. Розроблено аналітичний апарат, що описує просторово-часову динаміку руху багатофазного потоку під час припосівної інокуляції. Модель враховує взаємозв'язок між гідравлічними параметрами форсунки, кінематикою вільного падіння насінини та механізмом адгезії крапель. На основі чисельних розрахунків побудовано узагальнену номограму, яка графічно відображає залежність ефективності інокуляції від конструктивно-режимних параметрів модуля і дозволяє оперативно визначати раціональні режими роботи.

4. Досліджено за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) в середовищі ANSYS Fluent просторово-часову динаміку багатофазного потоку. Шляхом нелінійної оптимізації визначено теоретично раціональні

режими роботи: тиск у гідросистемі 0,4 МПа та діаметр сопла розпилювача 0,3 мм. Ця комбінація гарантує нанесення на кожну насінину цільової дози інокулянту (0,0025 г) за мінімальної питомої витрати рідини 2,15 л/га.

5. Експериментально підтверджено достовірність аналітичних розрахунків. Для фізичного моделювання розроблено оригінальний лабораторний стенд із мікропроцесорним керуванням та деталями, виготовленими за адитивними технологіями. За результатами повного факторного експерименту доведено високу адекватність теоретичної моделі: розрахункове значення критерію Фішера ($F_p = 2,85$) є меншим за табличне ($F_T = 4,08$), а коефіцієнт детермінації становить $R^2 = 0,983$.

6. Доведено агротехнічну ефективність розробленої системи в натурних умовах. Польові випробування модернізованого посівного агрегату на базі пневматичної сівалки Vega 8 Profi підтвердили його технологічну перевагу над традиційними методами. Локальна машинна інокуляція сприяла інтенсифікації вегетативних процесів (збільшення висоти рослин на 11,6 %) та забезпечила стабільний приріст урожайності зерна кукурудзи на 0,60 т/га. порівняно з ручною обробкою (приріст лише 0,40 т/га).

7. Підтверджено високу економічну доцільність інженерного рішення. Техніко-економічне обґрунтування засвідчило, що навіть за умов відрахування всіх капітальних витрат на переобладнання базової сівалки, інтеграція інокуляційного модуля у виробничий процес забезпечує стабільне підвищення річного економічного ефекту. За рахунок підвищеної врожайності отримано додатковий чистий прибуток у розмірі 4 320 грн з одного гектара порівняно з базовою технологією сівби. Отриманий фінансовий ефект повністю компенсує витрати на придбання біопрепаратів та амортизацію додаткового обладнання, гарантуючи експлуатаційну рентабельність і ресурсоощадність запропонованого технічного засобу.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА ЛІТЕРАТУРИ

1. Adamczewska-Sowińska K., Sowiński J. Polyculture Management: A Crucial System for Sustainable Agriculture Development. *Soil Health Restoration and Management*. 2020. P. 279–319. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8570-4_8.
2. Adeleke B. S., Ayangbenro A. S., Babalola O. O. Genomic assessment of *Stenotrophomonas indicatrix* for improved sunflower plant. *Curr Genet*. 2021. Vol. **67**. P. 891–907. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00294-021-01199-8>.
3. Ali B. et al. *Bacillus thuringiensis* PM25 ameliorates oxidative damage of salinity stress in maize via regulating growth, leaf pigments, antioxidant defense system, and stress responsive gene expression. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. **13**. P. 921668. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921668>.
4. Alzate Zuluaga M. Y. et al. Can Inoculation With the Bacterial Biostimulant *Enterobacter* sp. Strain 15S Be an Approach for the Smarter P Fertilization of Maize and Cucumber Plants? *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. **12**. P. 719873. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.719873>.
5. Anitha G., Kumar A. A., Rao A. S., Rao C. S. Sensor based Planter-cum-Site Specific Fungicide Applicator. *Agricultural Engineering Today*. 2019. Vol. **43**, № 1. P. 46–53.
6. ANSYS, Inc. *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. 2009.
7. Ashraf M., Akhtar M., Ahmad Q., Ahmad S. Development and laboratory testing of maize planter-cum-liquid fertilizer applicator. *Journal of Agricultural Research*. 2017. Vol. **55**, № 2.
8. Azeem M. et al. Drought Stress Amelioration in Maize (*Zea mays* L.) by Inoculation of *Bacillus* spp. Strains under Sterile Soil Conditions. *Agriculture*. 2022. Vol. **12**, № 1. P. 50. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010050>.
9. Bahraminia M. et al. Ionomic and biochemical responses of maize plant (*Zea mays* L.) inoculated with *Funneliformis mosseae* to water-deficit stress. *Rhizosphere*. 2020. Vol. **16**. P. 100269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100269>.

10. Bai J., Tian M., Li J. Control System of Liquid Fertilizer Variable-Rate Fertilization Based on Beetle Antennae Search Algorithm. *Processes*. 2022. Vol. **10**, № 2. P. 357. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10020357>.
11. Baker C. J. No-tillage Drill and Planter Design – Large-scale Machines. *No-tillage Seeding in Conservation Agriculture* / ed. by K. E. Saxton, C. J. Baker. CABI, 2007. P. 185–256.
12. Bautista E. U., Suministrado D. C., Koike M. Mechanical Deep Placement of Fertilizer in Puddled Soils. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*. 2000. Vol. **62**, № 1. P. 146–157. DOI: <https://doi.org/10.11357/jsam1937.62.146>.
13. Baweja P., Kumar S., Kumar G. Fertilizers and Pesticides: Their Impact on Soil Health and Environment. *Soil Health*. 2020. Vol. **59**. P. 265–285. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_15.
14. Bayer CropScience. (2023). Plant Protection and Seeds Product Catalog 2023. Kyiv, Ukraine. Available at: <https://www.bayer.com/uk/ua/ukraine-crop-science>.
15. Castelo R. et al. Growth-Promoting Endophytic Fungus (*Stemphylium lycopersici*) Ameliorates Salt Stress Tolerance in Maize by Balancing Ionic and Metabolic Status. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. **13**. P. 890565. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.890565>.
16. Castelo Sousa H. et al. *Bacillus aryabhattai* Mitigates the Effects of Salt and Water Stress on the Agronomic Performance of Maize under an Agroecological System. *Agriculture*. 2023. Vol. **13**, № 6. P. 1150. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13061150>.
17. Chaudhary P. et al. Assessment of Soil Health Indicators Under the Influence of Nanocompounds and *Bacillus* spp. In Field Condition. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. **9**. P. 769871. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.769871>.
18. Chen K. et al. Real-time missed seeding monitoring planter based on ring-type capacitance detection sensor. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2021.

Vol. **64**, № 2. P. 279–288.

19. Chen L. et al. Plant growth-promoting bacteria improve maize growth through reshaping the rhizobacterial community in low-nitrogen and low-phosphorus soil. *Biology and Fertility of Soils*. 2021. Vol. **57**, № 8. P. 1075–1088. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01598-6>.

20. Contreras-Liza S. et al. Yield and Agronomic Performance of Sweet Corn in Response to Inoculation with *Azospirillum* sp. Under Arid Land Conditions. *International Journal of Plant Biology*. 2024. Vol. 15, № 3. P. 683–691. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijpb15030050>.

21. Czarnes S. et al. Impact of soil water content on maize responses to the plant growth-promoting rhizobacterium *Azospirillum lipoferum* CRT1. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2020. Vol. **206**, № 5. P. 505–516. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12399>.

22. da Rosa D. P. et al. Inoculation Methods and Doses and Relationship with the Vegetative and Reproductive Development of Soybeans. *Journal of Experimental Agriculture International*. 2020. Vol. 42, № 7. P. 124–132. DOI: <https://doi.org/10.9734/JEAI/2020/v42i730561>.

23. da Silva M. J., Magalhães P.S.G. Modeling and design of an injection dosing system for site-specific management using liquid fertilizer. *Precision Agric.* 2019. Vol. 20. P. 649–662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9602-5>.

24. da Silva M., Magalhaes P. S. G. A liquid injection dosing system for site-specific fertiliser management. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. **163**. P. 150–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.005>.

25. Dahms R. N., Oefelein J. C., Shakal J. [et al.]. LES Simulation of the Internal Flow and Near-Field Spray Structure of an Outward-Opening GDi Injector and Comparison with Imaging Data. *SAE Technical Paper*. 2008. DOI: <https://doi.org/10.4216/2008-01-0137>.

26. Datsko O. et al. Increasing soils fertility as a factor in the sustainability of agriculture and resilience to climate change. *Modern Phytomorphology*. 2024. Vol. **18**. P. 110–113.

27. Denton M. D. et al. Legume inoculant application methods: effects on nodulation patterns, nitrogen fixation, crop growth and yield in narrow-leaf lupin and faba bean. *Plant and Soil*. 2017. Vol. **419**, № 1. P. 25–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-017-3317-7>.
28. Devram L. S., Mani I. Design and development of pressurized aqueous fertilizer application system for seeder. *Agricultural Engineering Today*. 2020. Vol. **44**, № 1. P. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.52151/aet2020441.1514>.
29. Doshi T. et al. Agritech Automation on Seeding and Fertigation: A Revolution in Agriculture. *IJISSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2015. Vol. **2**, № 11. P. 82–87.
30. Drazic M. et al. The Influence of the Application Technique and Amount of Liquid Starter Fertilizer on Corn Yield. *Agriculture*. 2020. Vol. **10**, № 8. P. 347. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10080347>.
31. Dražić M. S. *Development and optimization of novel electronic device for automatic control of liquid starter fertilizer injection in maize sowing*: Doctoral Dissertation. Belgrade, 2017. DOI: <https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/9370>.
32. Effect of droplet size on spray drift: [Table 1]. *ResearchGate*. 2024. URL: https://www.researchgate.net/figure/Effect-of-droplet-size-on-spray-drift_tbl1_384066191
33. El-Beltagi H. S. et al. Mulching as a Sustainable Water and Soil Saving Practice in Agriculture: A Review. *Agronomy*. 2022. Vol. **12**, № 8. P. 1881. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081881>.
34. Engel R. E. et al. A small-plot seeder and fertilizer applicator. *Agronomy Journal*. 2003. Vol. **95**, № 5. P. 1337–1341. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1337>.
35. Ferreira L. L. et al. Cause and effect relationships, multivariate approach for inoculation of *Azospirillum brasilense* in corn. *Communications in Plant Sciences*. 2019. Vol. **10**, № 1. DOI: <https://doi.org/10.26814/cps2020006>.
36. Field H. L., Long J. M. Machinery Calibration. *Introduction to*

Agricultural Engineering Technology: A Problem Solving Approach. Springer International Publishing, 2018. P. 107–142. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69679-9_8.

37. Foqué D., Nuyttens D. Effects of nozzle type and spray angle on spray deposition in ivy pot plants. *Pest Management Science*. 2011. Vol. **67**, № 2. P. 199–208. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.2051>.

38. Friedrichsen C. N. et al. Soil health and well-being: Redefining soil health based upon a plurality of values. *Soil Security*. 2021. Vol. **2**. P. 100004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100004>.

39. Garcia A. P., Cappelli N. L., Umezuru C. K. Electrically driven fertilizer applicator controlled by fuzzy logic. *Eng. Agric.* 2014. Vol. **34**, № 3. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000300014>.

40. Gassmann A., Weber P. Evaluation of Bt Corn and Soil-applied Insecticides for Management of Corn Rootworm Larvae. *Iowa State University Research and Demonstration Farms Progress Reports*. 2015. Vol. **1**, № 1.

41. Gavilanes F. Z. et al. Co-inoculation of *Anabaena cylindrica* with *Azospirillum brasilense* increases grain yield of maize hybrids. *Rhosphere*. 2020. Vol. **15**. P. 100224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100224>.

42. Ghazanfari M. H. [et al.]. CFD simulation of airflow behavior and particle transport and deposition in different breathing conditions through the realistic model of human airways. *ResearchGate*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.05.031>.

43. Gholami A. R. [et al.]. Particle Motion in Fluid: Analytical and Numerical Study. *ResearchGate*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2882.2647>

44. Gupta M. M. Arbuscular Mycorrhizal Fungi: The Potential Soil Health Indicators. *Soil Health*. 2020. Vol. **59**. P. 183–195. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_11.

45. He H. et al. Commercial organic fertilizer substitution increases wheat yield by improving soil quality. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. **851**.

P. 158132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158132>.

46. Hevko R. B. [et al.]. Results of studies on the influence of key parameters on the transverse uniformity of working fluid distribution by a boom sprayer. *ResearchGate*. 2011.

47. Hryhoriv Y. et al. Growth and Development of Sweet Corn Plants in the Agro–Ecological Conditions of the Western Region of Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. **24**, № 4. P. 216–222. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/162699>.

48. Huang X. et al. Design method and experiment of machinery for combined application of seed, fertilizer and herbicide. *Int J Agric & Biol Eng*. 2019. Vol. **12**, № 4. P. 63–71.

49. Ibrahim H. M., El-Sawah A. M. The Mode of Integration Between Azotobacter and Rhizobium Afect Plant Growth, Yield, and Physiological Responses of Pea (*Pisum sativum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2022. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00727-2>.

50. Jha Y., Mohamed H. I. Inoculation with *Lysinibacillus fusiformis* Strain YJ4 and *Lysinibacillus sphaericus* Strain YJ5 Alleviates the Effects of Cold Stress in Maize plants. *Gesunde Pflanzen*. 2023. Vol. **75**, № 1. P. 77–95. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00666-7>.

51. Jiménez J. Computational Fluid Dynamics. *arXiv:physics/0409104*. 2004. URL: <https://arxiv.org/abs/physics/0409104>

52. Jinal H. N., Gopi K., Kumar K., Amaresan N. Effect of zinc-resistant *Lysinibacillus* species inoculation on growth, physiological properties, and zinc uptake in maize (*Zea mays* L.). *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, № 6. P. 6540–6548. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10998-4>.

53. Jinlong F., Shujuan Y., Qichao L. Design of deep-fertilization mechanism with deformed gears and performance tests. *NMATEH-Agricultural Engineering*. 2021. Vol. **65**, № 3. DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-65-34>.

54. Jordan D. L. et al. Influence of Inoculation with *Bradyrhizobia* and

Nitrogen Rate on Yield and Estimated Economic Return of Virginia Market-Type Peanut. *Crop, Forage & Turfgrass Management*. 2018. Vol. 4, № 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.2134/cftm2018.01.0002>.

55. Karthikeyan S., Samuel Raja R., Kumar R. A Novel Approach to Wave Energy Conversion Using CFD Technique. *ResearchGate*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0041>.

56. Kasal Y. G., Thakare S. K., Shete P. P. Effect of pressure attribute on rate of application in liquid fertilizer application system. *Plant cell biotechnology and molecular biology*. 2019. Vol. 20(1-2). P. 67–72.

57. Khan N. et al. Current Progress and Future Prospects of Agriculture Technology: Gateway to Sustainable Agriculture. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 9. P. 4883. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13094883>.

58. Khatoon Z. et al. Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 273. P. 111118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111118>.

59. Kostenko O. et al. Increasing the effectiveness of aggregates for planting sugar beet stecklings to receive elite seeds. *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17, № 4. P. 1649–1664. DOI: <https://doi.org/10.15159/ar.19.194>.

60. Kumar A. et al. Salt-tolerant plant growth-promoting *Bacillus pumilus* strain JPVS11 to enhance plant growth attributes of rice and improve soil health under salinity stress. *Microbiological Research*. 2021. Vol. 242. P. 126616. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126616>.

61. Kumawat K. C. et al. Co-inoculation of indigenous *Pseudomonas oryzihabitans* and *Bradyrhizobium* sp. modulates the growth, symbiotic efficacy, nutrient acquisition, and grain yield of soybean. *Pedosphere*. 2022. Vol. 32, № 3. P. 438–451. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60085-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60085-1).

62. Kusale S. P. et al. Inoculation of *Klebsiella variicola* alleviated salt stress and improved growth and nutrients in wheat and maize. *Agronomy*. 2021. Vol. 11, № 5. P. 927. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050927>.

63. Kusi N. Y. O. et al. Phosphorus fertilization and enhanced efficiency products effects on sugarbeet. *Industrial Crops and Products*. 2021. Vol. **171**. P. 113887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113887>.
64. Lal R. Soils and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2008. Vol. **28**, № 1. P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:2007025>.
65. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974. Vol. 3, no. 2. P. 269–289. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
66. Lehmann J., Bossio D. A., Kögel-Knabner I., Rillig M. C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020. Vol. **1**, № 10. P. 544–553. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>.
67. Lei X., Liao Q., Zhang Q. Air-seeds flow analysis in a distributor head of an air drill seeder. *ResearchGate*. 2014. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1008.34>
68. Li M.-Y. et al. Seven-year long-term inoculation with *Funneliformis mosseae* increases maize yield and soil carbon storage evidenced by in situ ¹³C-labeling in a dryland. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. **944**. P. 173975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173975>.
69. Li X., Sun P., Zhang Y., Jin C., Guan C. A novel PGPR strain *Kocuria rhizophila* Y1 enhances salt stress tolerance in maize by regulating phytohormone levels, nutrient acquisition, redox potential, ion homeostasis, photosynthetic capacity and stress-responsive genes expression. *Environmental and Experimental Botany*. 2020. Vol. **174**. P. 104023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104023>.
70. Lichtfouse E. et al. Agronomy for Sustainable Agriculture: A Review. *Sustainable Agriculture*. 2009. P. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_1.
71. Liu Y., Yang Y., Wang B. Entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* play roles of maize (*Zea mays*) growth promoter.

Scientific Reports. 2022. Vol. **12**, № 1. P. 15706. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19899-7>.

72. Mahapatra S., Yadav R., Ramakrishna W. *Bacillus subtilis* impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde. *Journal of Applied Microbiology*. 2022. Vol. **132**, № 5. P. 3543–3562. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.15480>.

73. Manea D. et al. Mechanized Application of the Microbial Inoculants at Vegetable Plants Sowing. *Bulletin UASMV Agriculture*. 2009. Vol. **66**(1). P. 381–386.

74. Maude R. B. Seed treatment. *Pesticide Application Methods* / ed. by G. A. Matthews. London: Longman, 1996. P. 223–245.

75. Mehboob N. et al. Seed priming with boron and *Bacillus* sp. MN54 inoculation improves productivity and grain boron concentration of chickpea. *Crop and Pasture Science*. 2022. Vol. **73**, № 5. P. 494–502. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP21377>.

76. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32, no. 8. P. 1598–1605. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>

77. Mishchenko Y. et al. Microbiological Activity of Soil Under the Influence of Post–Harvest Siderates. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. **23**, № 4. P. 122–127. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/146612>.

78. Mockeviciene I. et al. Effect of long-term application of organic fertilizers on improving organic matter quality in acid soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2022. Vol. **68**, № 9. P. 1192–1204. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1875130>.

79. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2021. 838 p. (Fluid Mechanics and Its Applications; vol. 113). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72884-7>.

80. Naeem U. et al. Investigating the effect of *Aspergillus niger* inoculated

press mud (biofertilizer) on the potential of enhancing maize (*Zea mays* L.) yield, phosphorous use efficiency, and phosphorous agronomic efficiency. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14, № 8. P. 666. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07025-2>.

81. Notununu I. et al. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on the molecular responses of maize under drought and heat stresses: A review. *Pedosphere*. 2022. Vol. 32, № 1. P. 90–106. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60051-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60051-6).

82. Nuyttens D. et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 97(3). P. 333–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001>.

83. Nyord T. et al. Injection methods to reduce ammonia emission from volatile liquid fertilisers applied to growing crops. *Biosystems Engineering*. 2008. Vol. 100, № 2. P. 235–244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.01.013>.

84. O’Callaghan M., Ballard R. A., Wright D. Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Soil Use and Management*. 2022. Vol. 38, № 3. P. 1340–1369. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12811>.

85. Oliveira D. P. et al. Liquid Inoculation with Rhizobia in the Planting Furrow of Common Bean under No-Till Is Feasible under Different Soil and Climatic Conditions. *Crop Science*. 2019. Vol. 59, № 5. P. 2178–2184. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.08.0522>.

86. Orth M., Börner M., Pietsch-Braune S., Heinrich S. Influence of spray parameters on injected droplets and product properties in fluidized bed spray granulation. *Powder Technology*. 2024. Vol. 448. P. 120274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120274>

87. Ortiz A., Sansinenea E. The Role of Beneficial Microorganisms in Soil Quality and Plant Health. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, № 9. P. 5358. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095358>.

88. Ovcharuk O. V. et al. Biological fixation of nitrogen by agrocenoses of

soy and application of inoculants. *Current state of science in agriculture and environmental management: theory and practice*. 2020. P. 132–135.

89. Pahalvi H. N. et al. Chemical Fertilizers and Their Impact on Soil Health. *Microbiota and Biofertilizers*. 2021. Vol. 2. P. 1–20. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1.

90. Pedrini S., Merritt D. J. Seed coating: science or marketing spin? *Trends in Plant Science*. 2016. Vol. 22(2). P. 106–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.11.002>.

91. Pierson W. L. et al. Soybean Yield Response to In-furrow Fungicides, Fertilizers, and Their Combinations. *Crop, Forage & Turfgrass Management*. 2018. Vol. 4, № 1. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2134/cftm2017.10.0073>.

92. Plumblee M. T., Mueller J. D. Implementing precision agriculture concepts and technologies into crop production and site-specific management of nematodes. *Integrated Nematode Management: State-of-the-art and Visions for the Future* / ed. by R. A. Sikora et al. CAB International, 2021. P. 421–427. DOI: <https://doi.org/10.1079/9781789247541.0059>.

93. Popescu E., Nenciu F., Vladut V. A new strategic approach used for the regeneration of soil fertility, in order to improve the productivity in ecological systems. *Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*. 2022. Vol. 11. P. 265–272.

94. Poppeliers S. W., Sánchez-Gil J. J., De Jonge R. Microbes to support plant health: Understanding bioinoculant success in complex conditions. *Current Opinion in Microbiology*. 2023. Vol. 73. P. 102286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2023.102286>.

95. Porombka P., Schlottke J. Euler–Euler simulation of multi-regime two-phase flows with thin liquid films. *Experimental and Computational Multiphase Flow*. 2025. Vol. 7, no. 2. P. 197–210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42757-024-0227-9>

96. Qiao D. et al. How Agricultural Extension Services Improve Farmers' Organic Fertilizer Use in China? The Perspective of Neighborhood Effect and

Ecological Cognition. *Sustainability*. 2022. Vol. **14**, № 12. P. 7166. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127166>.

97. Radchenko M. V. et al. Adaptation of various maize hybrids when grown for biomass. *Agronomy Research*. 2022. Vol. **20**, № 2. P. 404–413. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.22.028>.

98. Renoud S. et al. Effect of Inoculation Level on the Impact of the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 on Selected Microbial Functional Groups in the Rhizosphere of Field Maize. *Microorganisms*. 2022. Vol. **10**, № 2. P. 325. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020325>.

99. Rezende W. S. et al. nocolation of maize with *Azospirillum brasilense* in the seed furrow. *Revista Ciência Agronômica*. 2016. Vol. **47**(2). P. 290–298. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160034>.

100. Ribeiro V. P. et al. Co-inoculation with tropical strains of *Azospirillum* and *Bacillus* is more efficient than single inoculation for improving plant growth and nutrient uptake in maize. *Archives of Microbiology*. 2022. Vol. **204**, № 2. P. 143. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02759-3>.

101. Roberts J., Wypych P., Hastie D. Analysis and validation of a CFD-DPM method for simulating dust suppression sprays. *Particulate Science And Technology*. 2021. Vol. 40, no. 459. P. 1–12 DOI: [10.1080/02726351.2021.1951907](https://doi.org/10.1080/02726351.2021.1951907).

102. Rocha I. et al. Seed coating: a tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. **10**. P. 1357. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01357>.

103. Romero F. et al. Soil health is associated with higher primary productivity across Europe. *Nature Ecology & Evolution*. 2024. Vol. **8**, № 10. P. 1847–1855. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02511-8>.

104. Sahu P. K. et al. Bioformulation and Fluid Bed Drying: A New Approach Towards an Improved Biofertilizer Formulation. *Eco-friendly Agrobiological Techniques for Enhancing Crop Productivity* / ed. by R. S. Sengar, A. Singh. Springer Nature Singapore, 2018. P. 47–62. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6934-5_3.

105. Sammauria R. et al. Microbial inoculants: Potential tool for sustainability of agricultural production systems. *Archives of Microbiology*. 2020. Vol. 202, № 4. P. 677–693. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01795-w>.
106. Santoni M. et al. A review of scientific research on biodynamic agriculture. *Organic Agriculture*. 2022. Vol. 12, № 3. P. 373–396. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00394-2>.
107. Schiffmann J., Alper Y. Inoculation of peanuts by application of Rhizobium suspension into the planting furrows. *Experimental Agriculture*. 1968. Vol. 4, № 3. P. 219–226.
108. Scott Tubbs R. et al. Effect of inoculant and nitrogen application at planting on peanut production in Georgia. *Crop Management*. 2012. Vol. 11, № 1. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1094/CM-2012-0823-01-RS>.
109. Shah K. K. et al. Role of soil microbes in sustainable crop production and soil health: A review. *Agricultural Science and Technology*. 2021. Vol. 13, № 2. P. 109–118. DOI: <https://doi.org/10.15547/ast.2021.02.019>.
110. Shahane A. A., Shivay Y. S. Soil Health and Its Improvement Through Novel Agronomic and Innovative Approaches. *Frontiers in Agronomy*. 2021. № 3. P. 680456. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.680456>.
111. Sharda A., Fulton J. P., Taylor R. K. Performance of variable-orifice nozzles for liquid fertilizer applications. *Applied Engineering in Agriculture*. 2016. Vol. 32, № 3. P. 347–352. DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.32.11428>.
112. Shelest M. et al. System of pre-sowing seed inoculation. *Scientific Horizons*. 2023. Vol. 26(7). P. 140–148. DOI: <https://doi.org/10.48077/scihor7.2023.140>.
113. Sible C. N., Seebauer J. R., Below F. E. Plant Biostimulants: A Categorical Review, Their Implications for Row Crop Production, and Relation to Soil Health Indicators. *Agronomy*. 2021. Vol. 11, № 7. P. 1297. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11071297>.
114. Singh S. P., Kumar A., Kushwaha H. L. Sugar cane Canopy Spraying: A Perspective Solution with Ergonomics and Mechatronics Approach. *Sugar Tech*.

2020. Vol. **22**. P. 203–207. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00766-1>.

115. Sornek R. J., Dobashi R., Hirano T. Effects of turbulence on dispersion and vaporization of droplets in spray combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2000. Vol. 28, no. 1. P. 1055–1062. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(00\)80314-8](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80314-8)

116. Soto-Gómez D., Pérez-Rodríguez P. Sustainable agriculture through perennial grains: Wheat, rice, maize, and other species. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2022. Vol. **325**. P. 107747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107747>.

117. Stichler C., Livingston S. Reduced/Conservation Tillage in South and Central Texas. *Texas FARMER Collection*. 2003. URL: <https://hdl.handle.net/1969.1/87182>.

118. Sundaram P. K. et al. Design and Development of Fertilizer Metering System for Tractor drawn Liquid Fertilizer Applicator: Interaction of Root and microbes. *Journal of AgriSearch*. 2019. Vol. **6**, № 4. P. 211–214.

119. Tahat M. et al. Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*. 2020. Vol. **12**, № 12. P. 4859. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12124859>.

120. Takahashi W. Y. et al. Tracking maize colonization and growth promotion by Azospirillum reveals strain-specific behavior and the influence of inoculation method. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2024. Vol. **215**. P. 108979. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108979>.

121. Tilman D. Benefits of intensive agricultural intercropping. *Nature Plants*. 2020. Vol. **6**, № 6. P. 604–605. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0677-4>.

122. Tu J., Yeoh G. H., Liu C. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. 1st ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007. 456 p. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/computational-fluid-dynamics/9780750685634/>

123. Tyagi J. et al. Deploying a microbial consortium of *Serendipita indica*, *Rhizophagus intraradices*, and *Azotobacter chroococcum* to boost drought tolerance

in maize. *Environmental and Experimental Botany*. 2023. Vol. **206**. P. 105142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105142>.

124. Vanissa T. T. G. et al. The Response of Maize to Inoculation with *Arthrobacter* sp. And *Bacillus* sp. In Phosphorus-Deficient, Salinity-Affected Soil. *Microorganisms*. 2020. Vol. **8**, № 7. P. 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071005>.

125. Velten S. et al. What Is Sustainable Agriculture? A Systematic Review. *Sustainability*. 2015. Vol. **7**, № 6. P. 7833–7865. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7067833>.

126. Wang W. et al. Effects of seed furrow liquid spraying device on sowing quality and seedling growth of maize. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019. Vol. **12**, № 2. P. 68–74.

127. Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd ed. La Canada, California: DCW Industries, 2006. 534 p.

128. Wilson R. G. et al. Evaluation of insecticides and application methods to protect onions from onion maggot, *Delia antiqua*, and seedcorn maggot, *Delia platura*, damage. *Crop Protection*. 2015. Vol. **67**. P. 102–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.10.002>.

129. Xiuyun X. et al. Variable Rate Liquid Fertilizer Applicator for Deep-fertilization in Precision Farming Based on ZigBee Technology. *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. **52**, № 30. P. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.487>.

130. Xu R. et al. Evidence for a Dark Septate Endophyte (*Exophiala pisciphila*, H93) Enhancing Phosphorus Absorption by Maize Seedlings. *Plant and Soil*. 2020. Vol. **452**, № 1–2. P. 249–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04538-9>.

131. Xu Y. et al. Extracellular proteins of *Trichoderma pop-up* (Alley zhouense) elicit an immune response in maize (*Zea mays*) plants. *Plant and Soil*. 2020. Vol. **449**, № 1–2. P. 133–149. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04435-1>.

132. Yamin M. et al. VRT liquid fertilizer applicator for soil nutrient management. *Jurnal Teknologi*. 2016. Vol. **78**(1-2). P. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.11113/jt.v78.7271>.
133. Yang X. [et al.]. Computational Fluid Dynamics–Discrete Phase Method Simulations in Process Engineering: A Review of Recent Progress. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 9. P. 3856. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14093856>.
134. Yu C. et al. Development and Performance Evaluation of a Precise Application System for Liquid Starter Fertilizer while Sowing Maize. *Actuators*. 2021. Vol. **10**, № 9. P. 221. DOI: <https://doi.org/10.3390/act10090221>.
135. Yu J., Fu J., Yu J. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat. *ResearchGate*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.11.008>
136. Zhang J. et al. A Study on the Time Lag and Compensation of a Variable-Rate Fertilizer Applicator. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021. Vol. **37**, № 1. P. 43–52. DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.13855>.
137. Zhao J., Yang L. Simulation and experimental study on the atomization character of the pressure-swirl nozzle. *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2012. Vol. 2, no. 4A. DOI: 10.4236/ojfd.2012.24A032.
138. Zheng W. et al. Development of a liquid-jet nozzle for fertilizer injection in paddy fields using CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. **167**. P. 105061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105061>.
139. Zhou W., Wang J., Tang H. Structure optimization of cam executive component and analysis of precisely applying deep-fertilization liquid fertilizer. *Int J Agric & Biol Eng*. 2019. Vol. **12**, № 4. P. 104–109. DOI: 10.25165/j.ijabe.20191204.4865.
140. Zwertvaegher I., Verhaeghe M., Brusselman E., Verboven P. [et al.]. The impact and retention of spray droplets on a horizontal hydrophobic surface. *Biosystems Engineering*. 2014. Vol. 126. P. 82–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.013>
141. Аніскевич Л. В., Росамаха Ю. О. Конструктивні особливості

сошникових систем сучасних сівалок та їх відповідність вимогам точного землеробства. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 241. С. 269–278.

142. Бабинець Т. П. Порівняльна характеристика технічних засобів для протруювання насіння. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. 9(108). С. 34–38.

143. Біопрепарати для сучасного агровиробництва. Каталог продукції 2023 / БТУ-ЦЕНТР. Ладижин, 2023. 124 с. URL: https://btu-center.com/upload/iblock/789/Catalog_BTU_2023_web.pdf

144. Войтов В. А. *Машини для хімічного захисту рослин: теорія і розрахунок*. Харків: ХНТУСГ, 2012. 340 с.

145. Гевко Р. Б., Клендій О. М. Дослідження процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовими конвеєрами. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54. P. 131–138.

146. Герук С. М., Петриченко Є. А. Тенденції розвитку конструкцій посівних агрегатів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2014. № 1. С. 31–45.

147. Не Н З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. *Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин*. Київ : ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. 320 с.

148. Данильченко О. М., Жатова Г. О. Урожайність і якість насіння кормових бобів та сочевиці залежно від інокуляції бактеріальними препаратами і внесення мінеральних добрив. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2016. № 1 (1). С. 94–101.

149. Данильченко О. М., Коваленко І. М., Бутенко А. О. Продуктивність при внесенні різних доз мінеральних добрив та інокуляції насіння в умовах північно-східного Лісостепу України. *Наукові горизонти*. 2018. № 2. С. 29–34.

150. Дацько О. М. Рослинні пробіотики: вплив на рослини в умовах стресу. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія:*

Агрономія і біологія. 2021. Вип. 43. № 1. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.32845/agrobio.2021.1.2>.

151. Дідур І. М., Циганська О. І. Вплив способів передпосівної обробки насіння на продуктивність сільськогосподарських культур. *Сільське господарство та лісівництво*. 2018. № 9. С. 45–54.

152. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. [Чинний від 2010-10-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 83 с. (Національний стандарт України).

153. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основи та фундаменти споруд. Ґрунти. Методи польового визначення характеристик міцності та деформівності. [Чинний від 2010-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 75 с. (Державний стандарт України).

154. Єщенлітература до файлу 7 розділ 1.4 П. Г., Костогриз П. В., Опришко В. П. Основи наукових досліджень в агрономії : *підручник* / за ред. В. О. Єщенка. Київ : Дія, 2005. 286 с.

155. Захарчук В. О. Економічна ефективність використання адаптованих технічних засобів у фермерських господарствах. *Економіка АПК*. 2018. № 4. С. 56–62.

156. Калнагуз О. М., Семерня О. В., Ломекін Д. С. Способи внесення добрив. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» Інноваційні розробки в аграрній сфері*. 2021. № 2. С. 120–122.

157. Колісник О. та ін. Simulation of High-Product Soy Crops Based on the Application of Foliar Fertilization in the Conditions of the Right Bank of the Forest steppe of Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2024. Vol. 25, № 7. P. 234–243. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/188638>.

158. Костюченко Є., Бутар В., Романько С., & Лукашов В., Дослідження процесу припосівної інокуляції насіння сільськогосподарських культур. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Хімічне машинобудування*,

апаратобудування та силікатні виробництва. 2022. № 1 (61). С. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2022.254156>.

159. Котенко С. В. Підвищення ефективності передпосівної обробки насіння шляхом удосконалення робочих органів протруювача. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2017. Вип. **182**. С. 88–95.

160. Кюрчев В. М. Обґрунтування процесу приготування робочих сумішей для передпосівної обробки насіння. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Вип. **15**. С. 12–19.

161. Легкодух І., Легкодух Г. Внесення добрив посівними та ґрунтообробними машинами. *Техніка і технології АПК*. 2018. № **2** (110). С. 33–37.

162. Мойсеєнко В. К., Анікеєв О. І. Вплив якості нанесення інокулянтів на польову схожість насіння кукурудзи. *Бюлетень Інституту зернового господарства*. 2017. № 10. С. 25–29.

163. Орловський М. І. *Основи сільськогосподарського дослідництва*. Київ : Вища школа, 1993. 238 с.

164. Паламарчук В. Д., Соломон О. М. Вплив передпосівної обробки насіння на ріст і розвиток рослин кукурудзи та продуктивність гібридів різних груп стиглості. *Сільське господарство та лісництво*. 2022. № 1 (24). С. 23–44. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2022-1-2>.

165. ПАТ «Ельворті». *Сівалки пневматичні універсальні Vega 8 Profi, Vega 16 Profi: Каталог деталей та складальних одиниць*. Кропивницький, 2020. 154 с. <https://www.mdpi.com/2079-6412/15/8/939>

166. Роговський І. Л. Технічне забезпечення біотехнологічних процесів у рослинництві: *монографія*. Київ: НУБіП України, 2016. 288 с.

167. Сідерко В. П. та ін. *Механізація захисту рослин: підручник*. Київ: Аграрна освіта, 2013. 415 с.

168. Ткачук А. І. Обґрунтування параметрів змішувача-інокулятора насіння сої: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Вінниця, 2014. 185 с.

169. Фадєєв Л. В. Травмування насіння – прихована загроза врожаю.

Зерно. 2015. № 6. С. 72–78.

170. Шевчук В. В. Аналіз конструкцій протруювачів насіння та шляхи їх удосконалення. *Інженерія природокористування*. 2016. № 2(6). С. 15–21.

171. Шерстобосва О. В., Бунас А. А., Дем'янюк О. С. Вплив попередників та передпосівної інокуляції насіння штамом *Azotobacter vinelandii* 12m на врожайність кукурудзи і активність процесу азотфіксації. *Збалансоване природокористування*. 2020. № 1. С. 120–128. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2020.203941>.

ДОДАТКИ

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Shelest M., Kalnaguz A., Datsko O., Zakharchenko E., Zubko V. System of pre-sowing seed inoculation. *Scientific Horizons*. 2023. Vol. 26, no. 7. P. 140–148. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2023.140>.

2. Shelest M. S., Shuliak M. L., Butenko A. O., Bakumenko O. M., Zubko V. M., Datsko O. M., Masyk I. M., Yatsenko V. M., Sirovitskiy K. H., Rieznik S. V. Efficient maize cultivation: pre-sowing seed inoculation system - optimal nozzle pressure and diameter. *Agronomy Research*. 2024. Vol. 22, no. 2. P. 970–981. <https://doi.org/10.15159/AR.24.082>.

3. Шелест М. С. Сучасні системи проведення інокуляції посівного матеріалу просапних культур. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2023. № 3 (49). С. 90–97. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.13>.

4. Шелест М. С. Моделювання процесу інокуляції насіння для визначення параметрів розпилу рідини форсункою. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2025. № 4. С. 146–151. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.21>.

5. Шелест М. С. Оптимізація параметрів форсунки для забезпечення цільового покриття насіння робочою рідиною. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2026. № 1. С. 138–142. <https://doi.org/10.32782/msnau.2026.1.20>.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Шелест М. С. Створення моделі висіваючого апарату для просапних культур з можливістю інокуляції при використанні ARDUINO NANO.

Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (22 груд. 2022 р.). Харків, 2022. С. 204–205. URL: <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/>

7. Zubko V., Zhyhylii D., Shelest M. Pre-sowing inoculation system and its associated expenses. 4th Multidisciplinary Conference for Young Researchers (MCYR): book of abstracts (Prague, Czech Republic, 5–6 Oct. 2023). Prague, 2023.

8. Шелест М. С., Мясущка М. С. Система припосівної інокуляції, дослід оптимального тиску та діаметра форсунки. Матеріали XXIV Міжнародної наук. конф., присвяченої 90-річчю від дня народження Леоніда Погорілого (сmt Дослідницьке, 13 верес. 2024 р.). Дослідницьке, 2024. С. 81–84. URL: https://www.ndipvt.com.ua/uploads/ЗБІРНИК_ТЕЗ_2024.pdf

9. Шелест М. С. Вплив припосівної інокуляції на ріст і розвиток кукурудзи. Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (м. Суми, 14–18 квіт. 2025 р.). Суми, 2025. С. 346. URL: [ТЕЗИ_КВИТЕНЬ_2025_compressed_removed_removed2_removed.pdf](https://www.ndipvt.com.ua/uploads/ТЕЗИ_КВИТЕНЬ_2025_compressed_removed_removed2_removed.pdf)

10. Шелест М. С. Аналітичне моделювання кінематичної взаємодії насіниниз дрібнодисперсним потоком робочої рідини у висівному трубопроводі. Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (м. Суми, 13–17 квіт. 2026 р.). Суми, 2026. С. 501.

Список патентів:

11. Пат. на винахід 128378 Україна, МПК А01С 1/06, С12М 1/26. Спосіб припосівної інокуляції насіння / Шелест М. С., Дацько О. М., Плавинський В. І., Захарченко Е. А., Зубко В. М.; винахідники. – № а202200083; заявл. 10.01.2022; опубл. 26.06.2024, Бюл. № 26.

12. Пат. на корисну модель 151278 Україна, МПК А01С 1/06, С12М 1/26. Спосіб припосівної інокуляції насіння / Шелест М. С., Дацько О. М., Плавинський В. І., Захарченко Е. А., Зубко В. М.; винахідники. – № u202200077; заявл. 10.01.2022; опубл. 29.06.2022, Бюл. № 26.

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної та
навчальної роботи Сумського НАУ
д.е.н., професор

Маргарита ЛИШЕНКО



впровадження результатів дисертаційної роботи
асистента кафедри агроінжинірингу інженерно-технологічного факультету
Шелеста М.С. у навчальний процес кафедри агроінжинірингу Сумського НАУ

Представники інженерно-технологічного факультету Сумського національного аграрного університету: в особі декана, к.ф.-м.н., доцента Хурсенко Світлани Миколаївни та завідувача кафедри агроінжинірингу, д.т.н., професора Шуляка Михайла Леонідовича, склали цей акт про те, що матеріали дисертаційної роботи Шелеста Миколи Сергійовича використовуються при викладанні освітніх компонентів: «Сільськогосподарські машини», «Системи точного землеробства та їх використання в аграрному виробництві», «Інформаційні технології, штучний інтелект та системи точного землеробства», «Аналіз та оптимізація технологічних процесів в рослинництві» та «Апаратне і машинне забезпечення в системах точного землеробства» для спеціальності Н7 «Агроінженерія» за наступними освітніми програмами: ОПП «Агроінженерія» перший (бакалаврський) рівень вищої освіти та ОПП «Системи точного землеробства» другий (магістерський) рівень вищої освіти.

Результати роботи Шелеста М.С. доповнили освітні компоненти «Сільськогосподарські машини», «Системи точного землеробства та їх використання в аграрному виробництві», «Інформаційні технології, штучний інтелект та системи точного землеробства», «Аналіз та оптимізація технологічних процесів в рослинництві» та «Апаратне і машинне забезпечення в системах точного землеробства» сучасними методиками аналізу й оптимізації технологічних процесів точного землеробства, а саме, розробкою та обґрунтуванням раціональних параметрів апаратного забезпечення для систем локального внесення біопрепаратів з метою підвищення ефективності експлуатації посівних комплексів.

Дисертаційні дослідження Шелеста М.С. доповнили освітні компоненти можливістю проектування та програмування мікропроцесорних блоків керування для сільськогосподарської техніки, а також використання геоінформаційних даних і супутникового моніторингу (за індексом NDVI) для просторової оцінки ефективності роботи апаратних систем при виконанні здобувачами вищої освіти лабораторних робіт, а також при виконанні кваліфікаційних (бакалаврських, магістерських) робіт, спеціальності Н7 «Агроінженерія» за наступними освітніми програмами: ОПП «Агроінженерія» перший (бакалаврський) рівень вищої освіти та ОПП «Системи точного землеробства» другий (магістерський) рівень вищої освіти.

Завідувач кафедри агроінжинірингу
д.т.н., професор

Михайло ШУЛЯК

Декан інженерно-технологічного
к.ф.-м.н., доцент

Світлана ХУРСЕНКО



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(СНАУ)

вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, тел. +38 (0542) 70 10 10, факс: +38 (0542) 70 10 55
e-mail: admin@snau.edu.ua, https://snau.edu.ua
Код ЄДРПОУ 04718013

27 04 2026 № ДБ.У/03/819

На № _____ від _____

Довідка

про впровадження результатів наукових досліджень

Шелеста Миколи Сергійовича

у навчальний процес Сумського національного аграрного університету

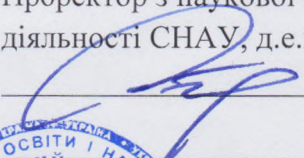
Видана в тому, що результати наукових досліджень Шелеста Миколи Сергійовича, асистента кафедри агроінжинірингу за темою завершених дисертаційних досліджень використовуються в навчальному процесі при викладанні дисциплін «Системи точного землеробства та їх використання в аграрному виробництві», «Сільськогосподарські машини», «Інформаційні технології, штучний інтелект та системи точного землеробства», «Аналіз та оптимізація технологічних процесів в рослинництві», «Апаратне і машинне забезпечення в системах точного землеробства» в Сумському національному аграрному університеті для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського), другого (магістерського) ступеня вищої освіти інженерно-технологічного факультету спеціальностей 208 Агроінженерія, Н7 Агроінженерія.

Проректор з наукової та
міжнародної діяльності




Юрій ДАНЬКО

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової та міжнародної діяльності СНАУ, д.е.н., професор

Данько Ю.І.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління - генеральний директор
АТ «Ельворті»

Калапа С.Г.



АКТ

АПРОБАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ В ДОСЛІДНО-ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ

Відповідно до програми спільної науково-дослідної роботи між СНАУ та АТ «Ельворті» було апробовано в дослідно-виробничих умовах конструктивно-технологічну схему та раціональні параметри інокуляційного модуля пневматичних просапних сівалок згідно з результатами дисертаційних досліджень Шелеста М.С.

В умовах дослідно-виробничої експлуатації на базі техніки АТ «Ельворті» під час проведення польових робіт було проведено виробничі випробування модернізованої висівної системи просапної сівалки модельного ряду Vega 8 Profi з інтегрованим модулем локального нанесення робочого розчину.

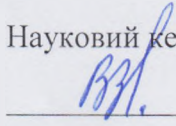
Згідно з рекомендаціями використання методів було проведено інтеграцію системи дозування та налаштування її раціональних режимів роботи. Отримані дані дозволили визначити рівень надійності роботи модуля, оцінити його вплив на загальний робочий процес машини та проаналізувати якість виконання технологічної операції (in-furrow). Випробування виконувались на серійних просапних сівалках.

В результаті випробувань встановлено:

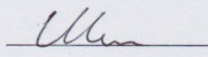
- повну сумісність розробленого інокуляційного модуля з базовими вузлами висівного апарата сівалки Vega 8 Profi без необхідності внесення критичних змін до її основної конструкції;
- мінімізацію питомих витрат робочого розчину із забезпеченням еталонного рівня покриття об'єкта обробки;
- зниження витрат розчинів на 10%;
- підвищення технологічної ефективності машини, що у підсумку забезпечило приріст врожайності сільськогосподарських культур (кукурудзи) на 9%.

За результатами дослідно-виробничої апробації розробленої конструкції модуля розрахунковий економічний ефект становив 4 320 грн на 1 гектар обробленої площі.

Від СНАУ


Науковий керівник, д.т.н., професор

Зубко В.М.

Відповідальний виконавець


Шелест М.С.

Від АТ «Ельворті»

Голова правління - генеральний директор


Калапа С.Г.



ДОДАТОК В

РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО (CFD) МОДЕЛЮВАННЯ

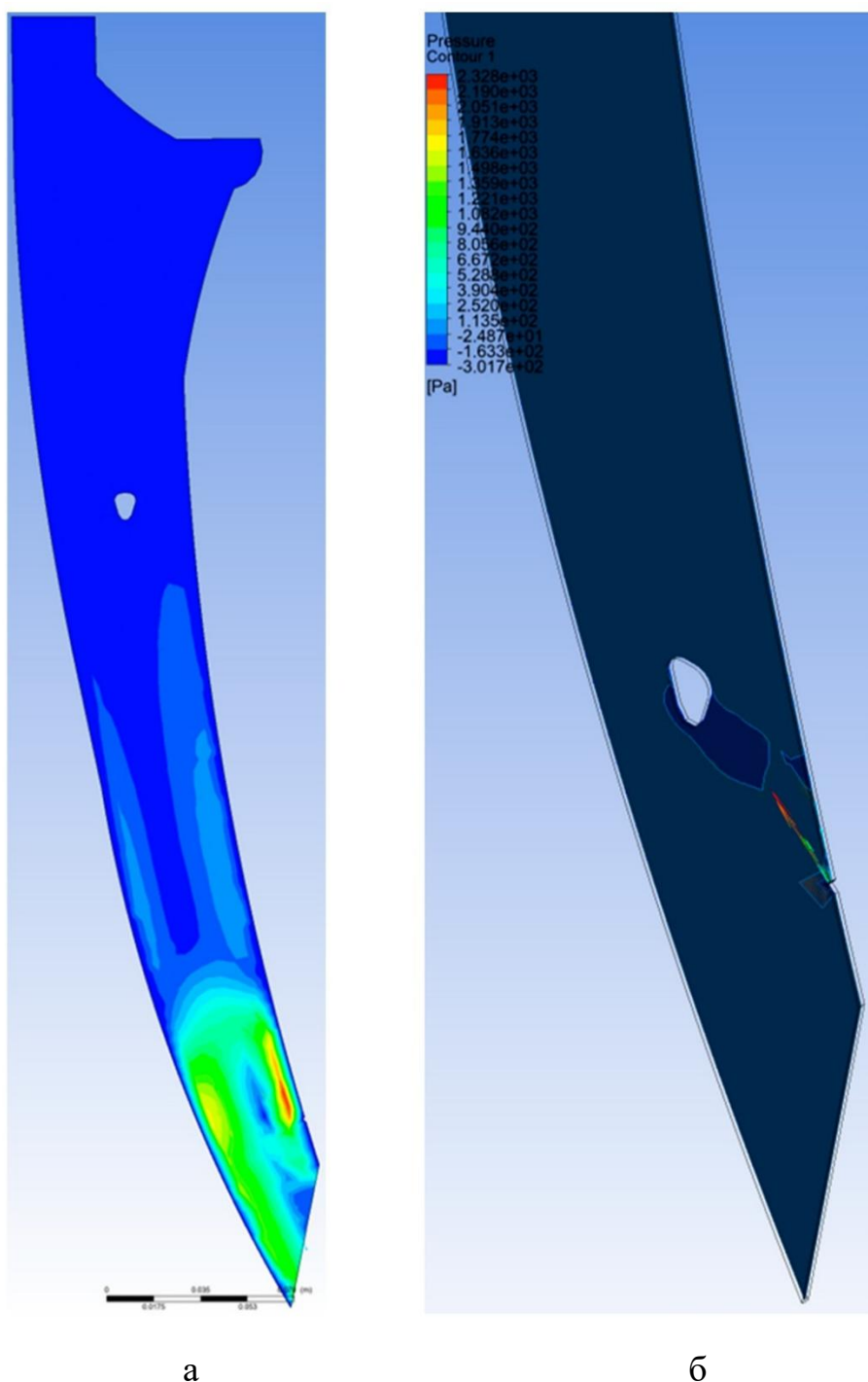


Рисунок В.1 – Візуалізація результатів CFD-аналізу робочого процесу інокуляційного модуля: а – візуалізація зон турбулентності та розподілу багатофазного потоку в нижній частині висівного апарата; б – контурний графік розподілу статичного тиску у просторі висівної системи пневматичної сівалки.

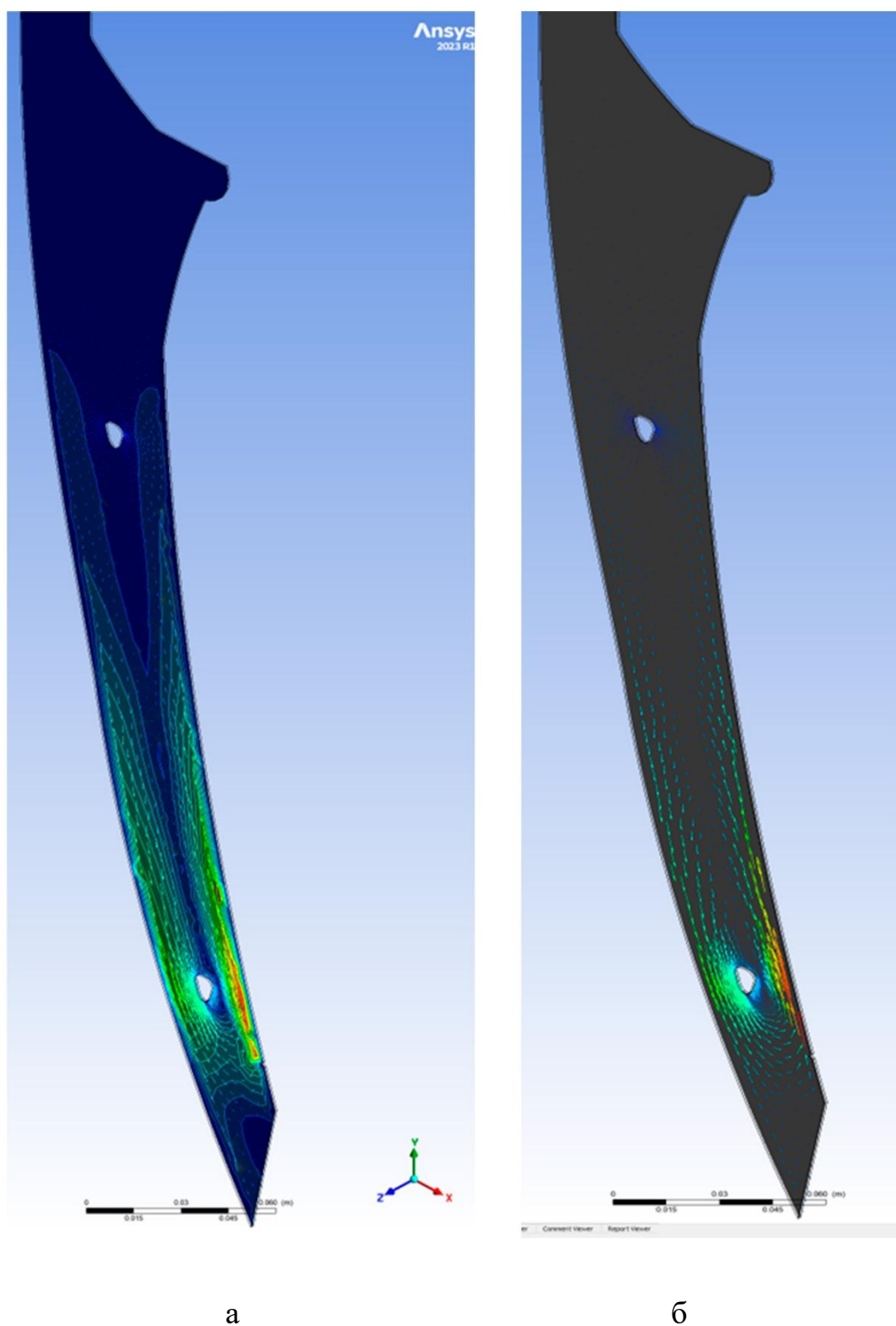
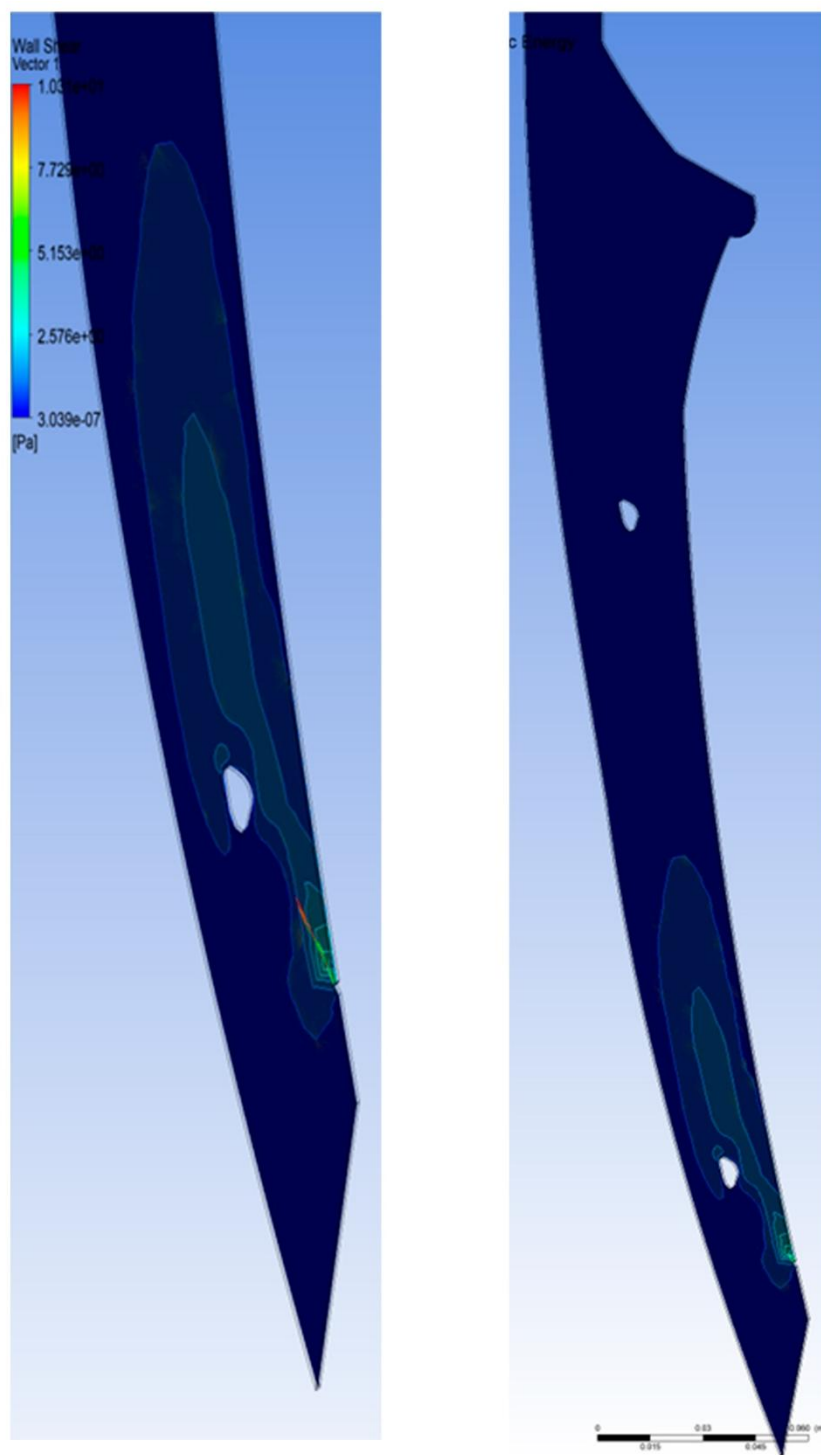


Рисунок В.2 – Результати чисельного моделювання багатофазного потоку в робочій зоні висівного пристрою: а – розподіл векторів швидкості дисперсного середовища в поздовжньому перерізі висівної трубки; б – векторне поле швидкостей багатофазного потоку в зоні локального розпилення рідкої фази.



а

б

Рисунок В.3 – Візуалізація результатів CFD-аналізу робочого процесу інокуляційного модуля: а – розподіл дотичних напружень на внутрішній поверхні висівної трубки під дією потоку; б – поле розподілу кінетичної енергії багатофазного потоку в каналі насіннепроводу.

**ДОКУМЕНТИ ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ**



