

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНИЙ
Завідувач кафедри агроінженерії та
технічного сервісу, к.т.н., професор
_____ Ірина ГУНЬКО
« ____ » _____ 2023 р.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБПРИСКУВАННЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР БІОЛОГІЧНИМИ ЗАСОБАМИ
ДЛЯ ЗНИЩЕННЯ ШКІДНИКІВ**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 208 Агроінженерія

Виконав: студент денної
форми навчання
Віктор МЕЛЬНИК
Керівник: к.т.н., доцент
Юрій ПАЛАДІЙЧУК

Вінниця 2023

Зміст

Анотація	5
ВСТУП	7
1.1. Аналіз використання біологічних засобів захисту рослин в сільському господарстві України	10
1.3. Компоненти системи обприскувачів	18
1.4. Перспективи використання біоконтролю в Україні	20
Висновки з Розділу 1	23
Розділ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	25
2.1. Технологія використання ентомопатогенних нематод для біологічного захисту рослин.....	25
2.3. Джерела потенційної шкоди всередині традиційного обладнання для розпилення	29
2.5. Властивості біопестицидів	33
Висновки з Розділу 2.....	41
Розділ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	42
3.1. Аналіз впливу концентраційного потоку на гідродинамічне пошкодження ентомопатогенних нематодах	42
3.2. Кількісна оцінка пошкодження ентомопатогенних нематод	43
3.3. Дослідження гідродинамічних характеристик потоку вздовж нематоли в межах різкого скорочення	45
Висновки з Розділу 3.....	51
Розділ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ АНАЛІЗ.....	52
4.1. Експериментальний проточний пристрій.....	52
4.2. Результати дослідження відносної життєздатності ентомопатогенних нематод у контексті обробки сопла.....	59
Висновки з Розділу 4.....	68

ВИСНОВКИ.....	4
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	69
ДОДАТКИ.....	71
	75

Анотація

Магістерська робота містить 80 сторінок машинописного тексту та 9 листів презентаційного матеріалу. Текст записки включає в себе вступ, чотири розділи, висновки та список літературних джерел, в тому числі 8 таблиць і 22 рисунків, використано 31 формул. Список використаних джерел містить 33 першоджерел.

Існують різні способи боротьби зі шкідниками та хворобами. Два найважливіші і найпоширеніші методи є біологічний і хімічний, але між цими двома методами існують великі відмінності. Постійно іде пошук високоефективних і екологічно безпечних систем захисту рослин, які були б альтернативою хімічному методу. Серед методів інтегрованої системи захисту рослин важливе місце належить біологічному методу захисту рослин.

Біологічний метод захисту рослин полягає у використанні для захисту сільськогосподарських культур від шкідливих організмів їх природних ворогів (хижаків, паразитів), продуктів їх життєдіяльності (феромонів, антибіотиків), створення сприятливих умов для діяльності корисних видів. Практичний інтерес до біологічного методу обумовлено тим, що він безпечний для людини і теплокровних тварин. Біологічні препарати не забруднюють довкілля, не спричиняють шкідливого впливу на оточуюче середовище, проявляють високу селективну дію, зручні для виробництва і мають невичерпні ресурси для постійного нарощування обсягів.

Ключові слова: захист рослин, розпилення, обприскування, біологічні агенти, мікроорганізми, біопестициди.

Summar

The master's thesis contains 80 pages of typewritten text and 9 sheets of presentation material. The text of the note contains an introduction, four chapters, conclusions and a list of literary sources, including 8 tables and 22 figures, 31 formulas are used. The list of used sources contains 33 primary sources.

There are different ways to control pests and diseases. The two last and most common methods are biological and chemical, but there is a big difference between these two methods. The search for highly effective and environmentally safe plant protection systems, which were an alternative to the chemical method, is ongoing. Among the methods of the integrated system of plant protection, an important place belongs to the biological method of plant protection.

The biological method of plant protection is used to protect agricultural crops from harmful organisms of their natural enemies (predators, parasites), products of their vital activity (pheromones, antibiotics), creating favorable conditions for the activity of useful species. The practical interest in the biological method is due to the fact that it is safe for humans and warm-blooded animals. Biological drugs do not pollute the environment, do not cause harmful effects on the environment, show a high selective effect, are convenient for production and have inexhaustible resources for constant increase in volumes.

Key words: plant protection, spraying, spraying, biological agents, microorganisms, biopesticides.

ВСТУП

Кожна сільськогосподарська культура потребує ретельного догляду, інакше про високий урожай можна забути. За багато років проведення господарської діяльності та обробітку ґрунту було винайдено чимало засобів, які допомагають забезпечувати оптимальний ріст культур та їхній активний розвиток. Адже існує безліч негативних факторів, здатних звести до мінімуму всі старання аграріїв отримати урожай. Тому сьогодні складно уявити агровиробництво без використання хімічних спецзасобів захисту посівів чи насаджень від різного негативного на них впливу.

Мікроорганізми, шкідники та бур'яни істотно впливають на нормальну вегетацію культур, їх негативна життєдіяльність може призвести до втрати значних посівних площ. Тому засоби захисту рослин користуються все більшим попитом у сільському господарстві.

На сьогодні існує декілька класифікацій засобів захисту рослин, що забезпечують боротьбу з джерелом зараження. Так, всі препарати ділять на дві групи: хімічні і біологічні засоби захисту рослин. Перша ще має назву пестициди, і наразі використовується аграріями найбільш активно. Крім цього, вирізняють класифікацію за складом, характером дії, токсичністю та призначенням.

Біологічні методи – основа стратегічного біоекологічного контролю шкідливого організму в сільськогосподарських посівах. Засоби біологічного захисту рослин починають користуватися більшим попитом через потреби екологізації землеробства.

Подібні за складом препарати одного класу показують різну пестицидну та токсичну властивість, також відрізняються за силою дії та призначенням. Проте, незважаючи на відмінності, сполуки демонструють схожі ознаки, а часто саме механізм дії.

У відміну від хімічних пестицидів, біопестициди представляють собою живі організми, що створює додаткові виклики у формуванні та доставці, оскільки біологічні агенти повинні залишатися живими під час застосування, щоб бути ефективними. Виникають обговорення про придатність існуючого обладнання для розпилення чи необхідності розробляти нове обладнання та системи доставки для їх застосування.

Біопестициди є новим екологічними засобами для боротьби з шкідниками, але їх впровадження на комерційному рівні може затриматися через потребу у новому обладнанні для розпилення. Тому перед тим, як розглядати нові системи доставки, важливо детально вивчити обмеження існуючого обладнання.

У звичайній гідравлічній системі розпилення рідкі суспензії постачаються з резервуара через регулятор тиску та клапани до сопла, де вони викидаються під тиском. Біологічні агенти можуть бути чутливі до різних фізичних впливів під час протікання через таку систему.

Для забезпечення безпеки і ефективності доставки біопестицидів, важливо вивчити, як фізичні явища впливають на біологічні агенти, зокрема ентомопатогенних нематодів, в системі розпилення.

Мета дослідження: дослідження процесу обприскування сільськогосподарських культур біологічними засобами з метою знищення шкідників і визначенні ефективності цього методу захисту рослин.

Завдання досліджень:

1. Провести літературний огляд щодо наявних біологічних засобів для боротьби з шкідниками сільськогосподарських культур.
2. Провести аналіз наявних способів та методів внесення засобів захисту рослин, конструкцію обладнання, включаючи оцінку їхньої ефективності та технічних характеристик.

3. Розробити методику обприскування, включаючи дозування та розподіл біологічних засобів на рослинах.

4. Провести польові експерименти для визначення ефективності використання обладнання при обприскування біологічними засобами у знищенні шкідників.

5. Визначити фактори, які можуть впливати на ефективність обприскування біологічними засобами та розробити рекомендації для покращення методу.

6. Провести статистичний аналіз результатів та зробити висновки щодо ефективності та сталих показників методу боротьби з шкідниками за допомогою біологічних засобів.

7. Розробити рекомендації щодо впровадження цього методу захисту рослин у сільському господарстві.

Об'єкт дослідження – процес обприскування сільськогосподарських культур біологічними засобами для знищення шкідників.

Предмет досліджень - особливості та ефективність процесу обприскування сільськогосподарських культур біологічними засобами для знищення шкідників.

Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз використання біологічних засобів захисту рослин в сільському господарстві України

Історія боротьби зі шкідниками сільськогосподарських культур датується з 2500 років до нашої ери, коли почали використовувати перші інсектициди на основі сірки у Шумерії. Однак значні зміни в цій галузі настали наприкінці 1940-х років, коли з'явилися синтетичні органічні пестициди, багато з яких були розроблені в рамках хімічної війни (Другої світової війни) і стали доступними для цивільного використання. Швидка ефективність і широкий спектр дії зробили хімічні пестициди стандартними засобами боротьби зі шкідниками, хворобами та бур'янами [1-3, 28-33].

Проте хлорорганічні пестициди (гексахлоран, алдрин, гептахлор) розкладаються дуже повільно, що може призвести до опору шкідників, забруднення навколишнього середовища та проблем зі здоров'ям людей. Залежність від пестицидів широкого спектру дії часто призводить до нестабільності в сфері захисту сільськогосподарських культур, де стійкість шкідників до інсектицидів, а також видалення природних ворогів, привело до відродження шкідників та вторинних спалахів їх чисельності [1-3].

Захист рослин у сільському господарстві надзвичайно важливий, оскільки шкідники та хвороби можуть серйозно впливати на врожайність та виробництво сільськогосподарських культур. За даними ФАО, щорічно втрачається 40% врожаю сільськогосподарських культур через ураження організму рослин тими чи іншими чинниками [3].

За десятиліття надмірне використання хімічних засобів захисту рослин призвело до загроз для біоценозів, забруднення навколишнього середовища,

розповсюдження резистентності у шкідників та втрати біорізноманітності через використання хімічних препаратів [1-5,28-33].

У зусиллях повернути увагу до цих проблем та враховуючи загрози для рослинного світу внаслідок хвороб, змін клімату та нападів шкідників, ООН провела ряд заходів, включаючи оголошення 2020 року Міжнародним роком здоров'я рослин. Мета полягає в акцентуванні на термінових проблемах захисту рослин.

З урахуванням зв'язку між здоров'ям рослин та охороною довкілля, актуальним стає використання екологічно безпечних методів контролю шкідників та хвороб через інтегровану систему захисту рослин та біологічний захист. Мінімізація використання отрутохімікатів у контролі шкідників сприяє охороні навколишнього середовища, підтримці корисних організмів та забезпечує безпеку для людей і тварин, які залежать від рослин [1-5, 28-33].

Сучасна стратегія захисту рослин прагне не викорінювати, а управляти шкідниками. Сучасні пестициди мають вузькі діапазони дії та терміни застосування. Незважаючи на це, питання стосовно непередбачених наслідків хімічних пестицидів залишаються актуальними, що спонукає до розвитку альтернативних методів контролю шкідників, зокрема біологічних пестицидів. [1-5].

Альтернативою використанню хімічних методів захисту рослин від шкідників, хвороб і бур'янів є біологічний підхід, який з кожним днем набуває все більшої актуальності. Переваги біологічного захисту полягають у тому, що він є безпечним для людини та теплокровних тварин. Агенти біологічного захисту не залишають негативного впливу на навколишнє середовище, мають високий рівень специфічності, є практичними для масового виробництва та не вичерпуються. Саме через ці переваги у екологічно розвинених країнах

біологічний метод захисту рослин вважається екологічно безпечним та є пріоритетною стратегією в програмах боротьби зі шкідливими організмами [1-5].

Застосування біологічного захисту рослин є актуальним і важливим інструментом для переходу до органічного та екологічного землеробства в Україні. Цей метод базується на використанні живих організмів для боротьби з шкідниками, патогенами та бур'янами [2,3, 28-33].

Аграрії з численних країн давно вже зрозуміли та успішно впроваджують переваги органічного землеробства. Це дозволяє знизити витрати на виробництво екологічних продуктів, сприяє збереженню природного середовища та біорізноманіття, а також відновлює природну родючість ґрунтів.

На сьогоднішній день, близько 90% комерційних біопестицидів у світі базуються на використанні різних видів і штамів бактерії *Bacillus thuringiensis* (Bt). Після цього за ступенем розповсюдження йдуть ентомопатогенні нематоди, біопрепарати на основі різних видів мікроміцетів та бактерій (рис. 1).



Рис. 1.1. Обсяг світового ринку біопестицидів, млрд. дол. США (за RESEARCH AND MARKETS, 2021, 2022).

Більшість глобального виробництва біопестицидів та біологічного контролю шкідників контролюють компанії зі Сполучених Штатів та

Європейського Союзу, що складає понад 75%. США переважно спеціалізуються на виробництві біопестицидів, тоді як країни ЄС, такі як Бельгія, Франція та Іспанія, фокусуються на біологічному контролі шкідників. Для виробництва понад 95% всіх світових засобів біозахисту відповідають 25 провідних компаній [2,3,28-33].

Світова екологічно чиста, фактично органічна продукція має вищі вартості порівняно із виробництвом за сучасними технологіями.

Згідно з видовою приналежністю та природою діючого складу, біопрепарати можна поділити на три основні групи (рис. 1.2):

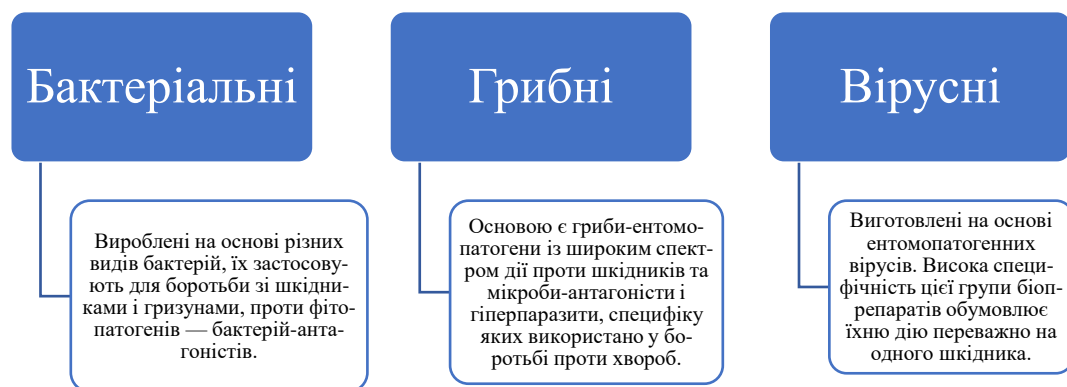


Рис. 1.2. Класифікація біологічних препаратів

Біопестицид, або справжній біологічний пестицид – це продукт, який містить живих організмів, що можуть розмножуватися після введення їх у навколишнє середовище. Серед таких організмів можуть бути бактерії, гриби, віруси, паразитоїди або хижаки. Паразитоїди та хижі комахи відіграють ключову роль у біологічному контролі комах-шкідників, але інші методи, такі як мікробні патогени та ентомопатогенні нематоди, стають все поширенішими. Ця тенденція

пов'язана з комерційним потенціалом мікробних патогенів і ентомопатогенних нематод для масового виробництва, довгого зберігання і можливості застосування зазвичай доступним обладнанням для розпилення [3].

Біологічні препарати розділяють на наступні види (рис.1.3):

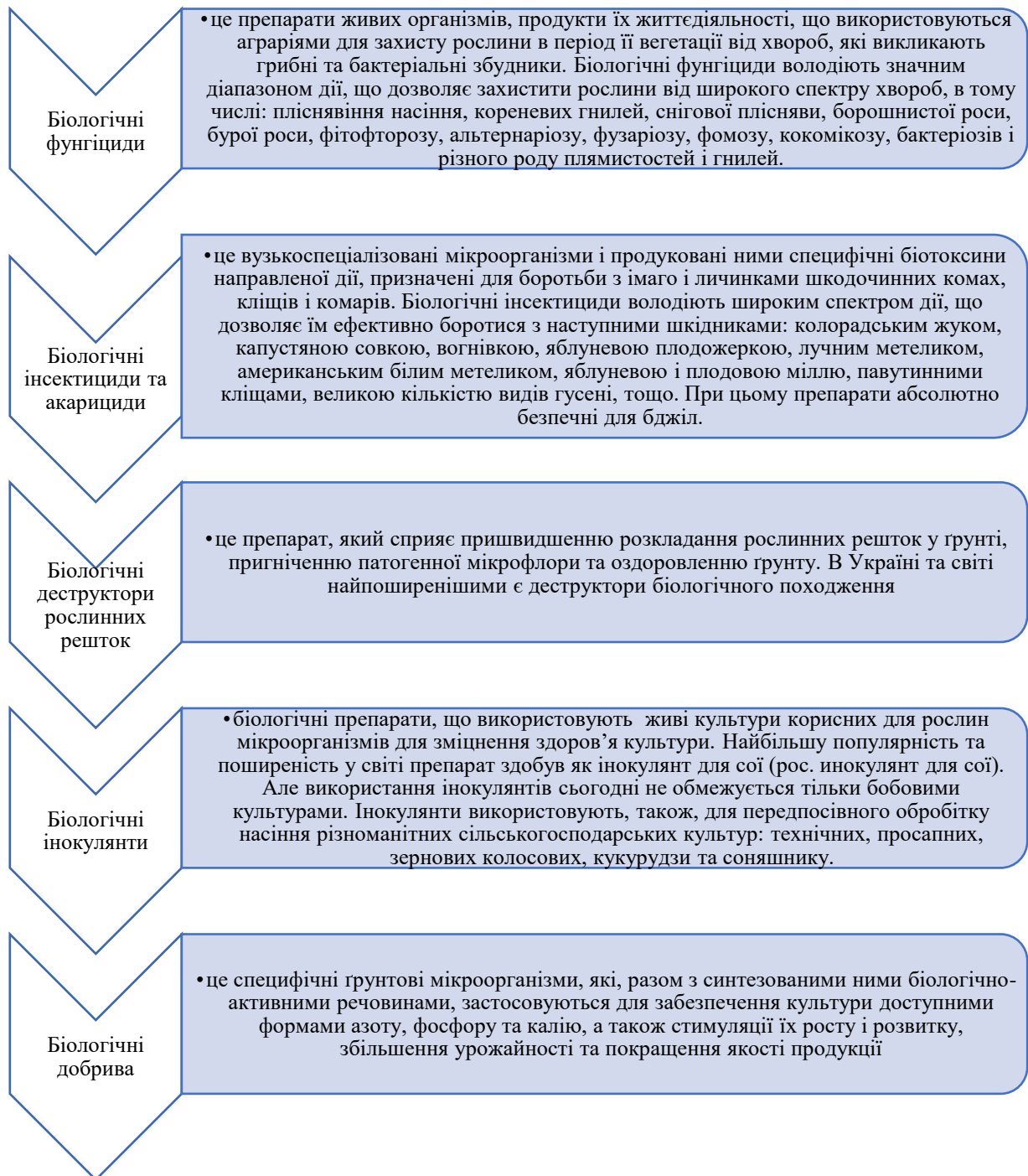


Рис. 1.3. Види біологічних препаратів [3].

Існує кілька основних причин, чому біопестициди не використовуються широко [1-5, 28-33].

Перша причина – це їх висока ціна. Більшість виробників біопестицидів є малими незалежними підприємствами, які спеціалізуються переважно на виробництві на замовлення, і це призводить до високих витрат. З обмеженим використанням біопестицидів попит на них залишається низьким, що у свою чергу не створює економію масштабу для виробників і підтримує високі витрати для споживачів.

Друга причина полягає в проблемах щодо якості та надійності біопестицидів. Деякі з цих проблем включають менше ефективну кількість організмів під час транспортування, невірний вид і низьку патогенність.

Відсутність доступних і передбачуваних методів для вивільнення біопестицидів є чи найголовнішою проблемою їх широкого впровадження. Деякі мікробні засоби успішно використовуються в полі за допомогою стандартного обладнання для розпилення, але існують унікальні вимоги для кожного організму, і розробка відповідних формул становить складність, яку не властива хімічним пестицидам [1-5, 28-33].

Сьогодні деякі рецептури включають сухі гранули зі сплячими мікроорганізмами або ентомопатогенними нематодами, які розчиняються у воді та розпилюються стандартним обладнанням. Існують менш коштовні альтернативи, такі як сухі носії, наприклад, вермикуліт, або паперові карти з макроскопічними біологічними контрольними засобами. Проте для їхнього вивільнення в полі використовуються ручні звільнювачі або спеціальне обладнання. У майбутньому важливим завданням є розробка ефективних водорозчинних складів, які можна надійно використовувати зі звичайними гідравлічними розпилювачами для обприскування сільськогосподарських культур [1-5, 28-33].

1.2. Традиційні сільськогосподарські системи для внесення засобів захисту рослин

Обприскувачі для сільського господарства бувають різних типів, розмірів, обладнання та технічних характеристик. Вони варіюються від невеликих точкових обприскувачів до дуже великих обприскувачів з великим покриттям землі і рослин [1-5].

Сільськогосподарські обприскувачі були спроектовані так, щоб оптимізувати їх застосовність і продуктивність для багатьох цілей, для яких призначені машини, незалежно від того, чи використовуються вони на сільськогосподарських культурах, рослинності або ґрунті. Сільськогосподарські обприскувачі часто використовуються для внесення води і водних / хімічних розчинів, що містять кислоти або їдкі речовини, для підвищення врожайності або боротьби з шкідниками; тобто добрива і пестициди [1-5, 28-33].

На сьогодні існують три типи обприскувачів:

1. Навісний обприскувач: більшість таких обприскувачів мають резервуари об'ємом від 400 до 1000 літрів та ширину захвату від 10 до 18 метрів.



Рис. 1.4. Обприскувач тракторний польовий ОГН-300/10 (Україна-Польща)

Навісні обприскувачі мають кілька переваг, таких як сумісність з практично будь-якими тракторами, навіть із старими моделями, доступність за прийнятною ціною та надійність. Однак серед недоліків можна виділити обмежену продуктивність [1-5].

2. Причипний обприскувач: резервуар і ширина захвату причіпних обприскувачів зазвичай більші, ніж у навісних, що дозволяє виконувати роботу на великих земельних ділянках.



Рис. 1.5. Обприскувач причіпний 565слав (BOGUSLAV) ОДИСЕЙ ОПК 2000-18
Базовий

Об'єм бака зазвичай становить щонайменше 2-4 кубічних метри, а ширина захвату - від 24 до 36 метрів. Переваги та недоліки цього типу обприскувачів ті ж самі, що й у навісних [1-5].

3. Самохідний обприскувач: цей тип обприскувачів з'явився на ринку зовсім недавно. З переваг можна відзначити високу продуктивність цього типу,

але, зрозуміло, високу ціну [1-5].



Рис. 1.6. Обприскувач самохідний JOHN DEERE 4830

1.3. Компоненти системи обприскувачів

Розпилювачі являють собою повністю інтегровані механічні системи, тобто вони складаються з різних частин і компонентів, які працюють разом для досягнення бажаного ефекту, в даному випадку – викиду розпилюється рідини. Це може бути так само просто, як ручної обприскувач, прикріплений до балону, який накачується і заповнюється за допомогою пружинного важеля, трубки і вакуумного тиску; або такий же складний, як обприскувач з вильотом штанги 150м. зі списком компонентів системи, які працюють разом для подачі розпилюється рідини [3,4, 28-33].

У сільськогосподарських обприскувачах, складові елементи системи включають в себе наступне: розпилювальне сопло, іноді з розпилювачем, ємність для рідини, насос для обприскування, регулятори тиску, клапани та ущільнювачі, а також трубопровід для рідини. Важливо відзначити, що насос для

обприскування має таку саму вагу, як і сам тип обприскувача, оскільки існує безліч різних видів насосів для обприскувачів з різними матеріалами конструкції, різними розмірами вхідних та вихідних отворів і різними характеристиками продуктивності [3,4, 28-33]. Серед поширених видів насосів для обприскувачів можна виділити діафрагмові, центробіжні та роликові насоси.

Система обприскування в сільському господарстві може значно змінюватися в залежності від обсягу та місця застосування. Основні компоненти гідравлічної системи обприскувача включають в себе контейнер для рідини, насос, клапани, систему подачі рідини та форсунки [3,4, 28-33].

Контейнер для зберігання рідини служить для зберігання робочого розчину, який ретельно перемішується перед використанням, часто за допомогою механічного або гідравлічного перемішування.

Насос відповідає за переміщення рідини з контейнера до розпилювача. Вибір насоса залежить від обсягу рідини та необхідного тиску для форсунок. Зазвичай використовують поршневі, центробежні, роликові або діафрагмові насоси [3,4, 28-33].

Клапани регулюють потік рідини в системі. Зазвичай використовуються клапани регулювання тиску та потоку для контролю подачі рідини до форсунок.

Форсунки відповідають за розпил рідини. Вони можуть бути різних типів, включаючи гідравлічні, центробежні, газові, кінетичні, термічні та електричні. Гідравлічні форсунки найчастіше використовуються для створення крапель шляхом пропускання рідини під тиском через малий отвір.

На форсунки можуть бути різноманітні класифікації, такі як віялові та конусні. Віялові форсунки розпилюють рідину в різні розміри крапель та зазвичай використовуються для обприскування гербіцидів та добрив на польових культурах [4, 28-33]. Конусні форсунки створюють конусоподібний розпил і

використовуються для розпилення контактних матеріалів на листя для контролю комах та грибкових захворювань.

Крім того, важливими елементами є регулятори тиску та клапани, які контролюють подачу рідини до форсунок. Різні типи насосів та клапанів регулювання потоку можуть бути використані залежно від конкретних вимог та умов застосування [4,5, 28-33].

Загалом, системи обприскування в сільському господарстві можуть бути досить різноманітними, проте вони базуються на цих основних компонентах для ефективного розпилення рідини на полях і культурах [4,5, 28-33].

1.4. Перспективи використання біоконтролю в Україні

В Україні наприкінці минулого століття створилися сприятливі умови для широкого використання біологічного методу захисту сільськогосподарських культур, який вважався найбільш природним і відповідним для екосистем. Однак в останні роки спостерігається стійка тенденція до переважання хімічних методів захисту сільськогосподарських культур над біологічними. Використання біологічних методів захисту зменшилося як у відносних вимірах, так і в абсолютних значеннях [4,5, 28-33].

Наприклад, у 1995 році біологічний захист сільськогосподарських культур використовувався на 3 023 тисячах гектарів, що становило 15,2% від загальної площі, де здійснювався захист сільськогосподарських культур. Проте з часом ця площа зменшилася, і, наприклад, у 2020 році становила лише 1 827,2 тисячі гектарів (3,6% від усіх площ) (табл. 1.1) [5, 28-33].

Таблиця 1.1. Обсяги застосування хімічного та біологічного методів захисту сільськогосподарських культур від шкідників, хвороб і бур'янів в господарствах України* [5, 28-33].

Рік	Обсяги застосування методів захисту с/г культур, усього тис.га	у тому числі, тис. га		Частка біологічних методів у загальних обсягах захисту с/г культур, %
		хімічні методи	біологічні методи	
1995	19824	16801	3023	15,2
2000	12970	11916	1054	8Д
2010	38588	36533	2055	5,3
2011	45856	43527	2329	5,1
2012	45191	43057	2134	4,7
2013	47535	45527	2008	4,2
2014	45586	43304	2282	5,0
2015	43816	41630	2186	5,0
2016	45173	43117	2056	4,6
2017	46798,1	44730	2068,1	4,4
2018	49106,1	47139	1967,1	4,0
2019	49833,2	47991	1842,2	3,7
2020	50562	48734,8	1827,2	3,6

* За даними Держпродспоживслужби України.

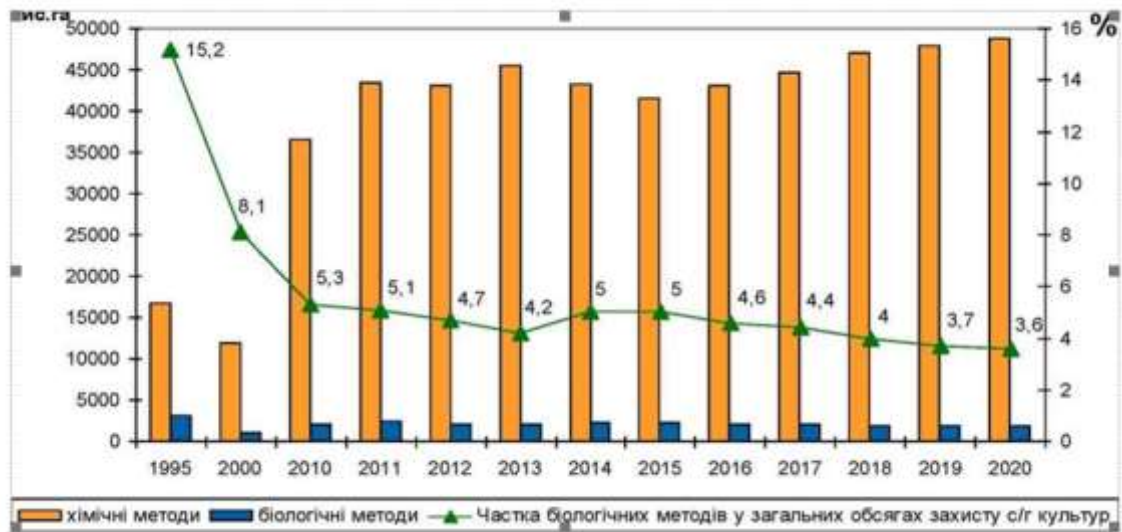


Рис. 1.7. Обсяги застосування хімічного та біологічного методів захисту сільськогосподарських культур від шкідників, хвороб і бур'янів в господарствах України

Водночас застосування хімічних методів захисту сільськогосподарських культур в господарствах України інтенсифікувалося і за аналогічний період зросло майже втричі: із 16801 тис. га у 1995 р. до 45527 тис. га у 2013 р. та 48734,8 тис. га у 2020 р. (див. табл. 1.1, рис. 1.7) [5, 28-33].

Ця тенденція, в цілому, свідчить про загальне зменшення інтересу агровиробників до використання біологічних методів. Проте ці дані не дають повної карти щодо обсягів використання біологічних препаратів для захисту рослин

Є окремі спроби аналізу ринку біопрепаратів для захисту рослин в Україні, проведені консалтинговою фірмою Pro-Consulting, які показують зростання частки біопрепаратів (в натуральному виразі) на ринку захисту рослин в Україні з 6,5% у 2019 році до 8,3% у 2020 році. Проте ці дані вимагають критичного підходу, оскільки є сумніви в повному обсязі виробництва біологічних засобів для захисту рослин в Україні, включаючи частку, яка надходить на внутрішній ринок [5, 28-33].

Оскільки державні статистичні спостереження щодо обсягів виробництва біологічних препаратів в натуральних і вартісних вимірах не проводяться, аналіз ринку може бути проведений лише на основі обмежених даних, які не мають офіційного підтвердження [5-8, 28-33]. Це призводить до спотворення інформації про реальний стан ринку біологічних препаратів в Україні і ускладнює вдосконалення механізмів його регулювання.

Висновки з Розділу 1

Подолання сучасних викликів у галузі сільськогосподарського виробництва в Україні вимагає розгляду альтернативних методів захисту рослин, включаючи біоконтроль. Перспективи використання біоконтролю в Україні вельми обіцяючі і відкривають широкий спектр можливостей для сталих та ефективних рішень у сільському господарстві. Нижче наведено деякі висновки щодо перспектив використання біоконтролю:

1. Екологічна безпека: Використання біопрепаратів для захисту рослин сприяє зниженню впливу шкідливих хімічних речовин на навколишнє середовище та здоров'я людей. Це сприяє створенню більш екологічно чистого та сталого сільськогосподарського виробництва.

2. Підвищення врожаю: Біопрепарати можуть ефективно контролювати шкідники та хвороби рослин, що дозволяє збільшити врожайність та покращити якість продукції. Це важливий аспект для задоволення попиту на продукти сільськогосподарського виробництва.

3. Зменшення витрат: Використання біопрепаратів може сприяти зменшенню витрат на пестициди та добрива, що дозволяє зменшити собівартість виробництва та підвищити прибутковість для агровиробників.

4. Ринкові можливості: Світовий попит на екологічно чисті та безпечні сільськогосподарські продукти зростає, і Україна може зайняти своє місце на світовому ринку, виробляючи продукцію з використанням біоконтролю.

5. Дослідження і інновації: Подальший розвиток біоконтролю в Україні потребує інвестицій у наукові дослідження та інновації. Використання сучасних технологій та підходів дозволить вдосконалити біопрепарати та їх ефективність.

Узагальнюючи, впровадження біоконтролю в сільському господарстві України може сприяти створенню сталого та прибуткового сектору сільськогосподарського виробництва, зменшенню негативного впливу на

навколишнє середовище та покращенню життя сільських громад. Ця перспектива вимагає системного підходу, співпраці між галузями та урядової підтримки для розвитку біологічних методів захисту сільськогосподарських культур в Україні.

Розділ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Технологія використання ентомопатогенних нематод для біологічного захисту рослин

Однією з найважливіших досягнень у галузі біологічних пестицидів є розвиток ентомопатогенних нематод. Ці пестициди визнані надзвичайно ефективними і відомими за своєю спроможністю боротися зі шкідливими комахами [6-8, 28-33].

Етапи життєвого циклу ентомопатогенних нематод включають яйця, чотири ювенільні стадії та дорослу стадію. Найкритичнішою є третя ювенільна стадія, відома як личинки дауера, яка є єдиною стадією, яка активно полює і не живе в трупі комах. Після кількох поколінь внутрішнього розвитку в трупі комах та вичерпання запасів їжі, ентомопатогенні нематоди переходять у стадію личинок третьої стадії, які можуть виживати поза трупом та шукати нового господаря [6-8, 28-33]. Процес інфікування комах відбувається, коли личинки вторгаються в тіло господаря через природний отвір. Кожен вид ентомопатогенних нематод взаємодіє лише з однією видовою бактерією.

Технології формулювання ентомопатогенних нематод значно покращилися протягом останніх двох десятиліть, зокрема щодо покращення терміну зберігання та спрощення використання [6-8]. Поліпшені стратегії формулювання засновані на zasadі збереження запасів енергії стадій ентомопатогенних нематод шляхом обмеження руху (фізична іммобілізація) або зменшення споживання кисню (фізіологічна іммобілізація). Це покращує термін зберігання ентомопатогенних нематод і спрощує їх застосування [6-8].

Однією з передових технологій є вододисперсійні гранули, що дозволяють подовжити термін зберігання ентомопатогенних нематод та покращити їх

стабільність. Це відкрило нові можливості застосування ентомопатогенних нематоди у сільському господарстві та інших галузях [6-8].

Ця передова технологія формулювання робить ентомопатогенних нематод більш доступними та ефективними засобами боротьби зі шкідниками в різних сферах виробництва.

2.2. Розвиток спеціалізованого обладнання

У 1995 році було розроблено та протестовано механічну систему для розподілу хижих кліщів *Phytoseiulus persimilis* у сухому вермикуліті як носії. Ця система включає ізольований резервуар для зберігання кліщів і ротаційний дозатор [6,7].

Робочий принцип полягає в тому, що при обертанні дозуючої пластини вміст резервуару рівномірно розподіляється, а при проходженні крізь отвір в нижній нерухомій пластині він випадає.

Додатково використовується стиснене повітря для забезпечення очищення кожної клітини. За результатами експерименту було виявлено, що ця механічна система працює швидше та ефективніше, ніж ручний процес розподілу, і має допустимі показники точності від -12% до 9,7%.

Окрім того, вказано, що використання сухого вермикуліту має свої недоліки, такі як важкість досягнення рівномірного розподілу кліщів, можливість утворення засмічень або кавітації в механічних пристроях, ризик механічних пошкоджень організмів та недостатня прилипання до листя [6,7].

Нещодавно були проведені дослідження з використанням рідких суспензій для розподілу організмів. Ці дослідження вказують, що рідкі суспензії можуть бути ефективним методом розподілу організмів і не суттєво впливають на їх розвиток і виживання. Використання рідких суспензій вимагає спеціалізованих

пристроїв, таких як Bio-Sprayer і Bug Dropper, [6,7] які були розроблені для цієї цілі.

Система Bio-Sprayer – це обладнання, яке монтується на тракторі і використовується для розподілу мікроорганізмів. Вона включає просту трубку з повітряним потоком, яка розпилює ці організми. Корисні організми зазвичай поширюються у спеціальній рецептурі, яка включає матеріал під назвою BioCarrier [7].

Цей матеріал забезпечує довгострокове зберігання яєць. Один із дослідників випробував систему Bio-Sprayer для розподілу паразитованих яєць *Trichogramma pretiosum* і виявив, що концентрація була значно меншою, ніж початкова концентрація в резервуарі обприскувача [7]. Це сталося переважно через прилипання яєць до стінок резервуара, і швидкість виходу яєць була зменшена на 60%. Дослідник також зауважив, що яйця не залишалися життєздатними більше двох годин після підтоплення в розчин BioCarrier, але аерація суспензії покращувала їх виживання. Швидкість потоку від розпилювача становила 277 м/хв[8-10].

Компанії відзначали ряд проблем з обладнанням, включаючи його вартість, і призупинили виробництво одиниць. Однак, деякі дослідники вірять, що система Bio-Sprayer має потенціал і може вимагати подальших покращень [8-10, 28-33]

Компанія AgAttack розробляє та продукує механічні дозатори для корисних комах і кліщів. Їх обладнання використовує гравітаційну систему для розподілу міксу організмів та носія на дозувальну пластину. Їх продукція включає два основних типи обладнання: Bug Dropper для використання в сільському господарстві та Bug Blower для використання в садівництві та виноградарстві. Ці дозатори доступні для монтажу на тракторах, рюкзаках та в теплицях на візках [8-10, 28-33].

Загальна рекомендація для застосування ентомопатогенних нематод - використовувати розпилювачі з соплами, в яких діаметр отворів більше 50 мікрон та робочим тиском менше 2000 кПа. Проте важливо відзначити, що ці рекомендації можуть не підходити для всіх видів ентомопатогенних нематод і ґрунтові налаштування можуть варіюватися [8-10, 28-33].

Науковці досліджували вплив способів нанесення на життєздатність ентомопатогенних нематод (особливого виду черв'яків) за допомогою ранцевого обприскувача (200 кПа, із діафрагмовим насосом і вентиляторною форсункою Hardi 4110-12) і розпилювача високого тиску (1000 і 2000 кПа, з поршневим насосом і форсункою з вихровим твердим конусом Wanjet розміром 1,2 мм). Вони не зафіксували значущого впливу на життєздатність ентомопатогенних нематод. Проте вони відзначили тенденцію до зменшення життєздатності нематод у випадку використання розпилювача високого тиску, особливо при збільшенні часу впливу на них у розпилювачі високого тиску [8-12].

Вчені вважали, що зниження життєздатності, швидше за все, було викликано механічним навантаженням від поршневого насоса і форсунки, а також можливо збільшенням температури рідини після кількох проходжень через насос.

Дослідники повідомили, що такі побічні ефекти не спостерігалися в ентомопатогенних нематод *Steinernema spp* і *Heterorhabditis bacteriophora* після проходження через різні види насосів (поршневі, центробіжні, роликові та діафрагмові), різні типи форсунок (системи розпилення XR8001VS, ТК-BC2, ФЛ-5BC) і фільтри різної густини (100 мікрон, 50 мікрон, 50 щілин) [8]. Проте вчені не навели чітких даних та критеріїв для оцінки виживання та інфекційності.

На основі огляду сучасної літератури, ентомопатогенні нематоди отримали певну увагу щодо технології нанесення. Однак фізичний вплив обладнання, яке використовується для розподілу компонентів на ентомопатогенних нематодах

під час процесу подачі, не був повністю врахований. Цей аспект може допомогти пояснити різноманітність результатів польових досліджень, зафіксованих раніше. Здатність ентомопатогенних нематод витримувати помірний тиск і проходити через звичайні отвори форсунок підтримує необхідність подальших досліджень використання високотискового гідравлічного обладнання для нанесення ентомопатогенних нематод [8-10].

2.3. Джерела потенційної шкоди всередині традиційного обладнання для розпилення

Змішування рідини є важливим аспектом використання пестицидів, оскільки ефективність їх розподілу вирішально впливає на результати обробки. Рідини-підвіски, такі як змочувальні порошки або вододисперсні гранули, часто важко рівномірно змішати через тверді частки, які осідають на дні резервуара для розпилювача [9]. Особливо важливою проблемою для біопестицидів є можливість потрапляння мікроорганізмів на дно бака розпилювача.

Традиційні системи розпилення можуть вимагати повторного проходження рідини через насос, що може бути шкідливим для організмів. Також, після численних проходжень через бак розпилювача, може виникати ризик зсуву та розтягувальних напруг, що може впливати на біологічні агенти. Деякі дослідники також вказують на можливий вплив підвищення температури під час довготривалого застосування пестицидів на біологічних агентів, хоча ця інформація ще не була належно підтверджена [8,9].

Деякі вчені досліджували вплив механічного накачування на організми, але багато досліджень не враховують різні типи насосів та їх вплив на біологічних агентів [9]. Таким чином, існує потреба у детальних дослідженнях щодо техніки змішування для біологічних засобів контролю шкідників у резервуарах для розпилення.

З отриманої інформації видно, що механічне накачування різних видів організмів для біологічного контролю може мати різний вплив в залежності від їх характеристик та особливостей [10]. Насоси з великим механічним тиском можуть пошкодити організми через розрив їх структури. Деякі насоси також можуть створювати надмірне тепло, що може бути шкідливим для організмів. Зважаючи на розмір, форму, жорсткість та стійкість до температури, різні види організмів можуть потребувати спеціальних режимів накачування, крім механічних насосів [10].

На жаль, на сьогоднішній день відсутні обширні дослідження, які порівнювали б вплив механічного накачування на організми. Оскільки розмір, форма, жорсткість та термічна стійкість організмів можуть бути важливими факторами для визначення ступеня їх пошкодження під час проходження через насоси, ця тема потребує додаткових досліджень [10].

Крім того, процес протікання через клапани може призводити до обмеження потоку через вузькі простори навколо перешкоди, що може завдати шкоди організмам. Навіть при повному відкритті регулюючих клапанів може відбуватися зменшення площі потоку або зміна напрямку потоку через порти клапанів, що може вплинути на динаміку потоку та завдати шкоди організмам [10-12]. На сьогоднішній день не проведено досліджень, які вивчали б вплив потоку суспензії через клапани на біологічні засоби контролю.

Також важливим є вивчення впливу гідравлічних сопел на організми біологічного контролю. Гідравлічні сопла створюють складний потік через звуження, який залежить від різноманітних параметрів, таких як геометрія, швидкість потоку та робочий тиск [10]. Цей потік включає в себе компоненти зсуву та розширення, і розробка відповідних рекомендацій щодо параметрів сопел є важливою для безпечного використання біопестицидів. Попередні дослідження використовували стандартні плоскі віялові насадки та повні конусні

форсунки для дослідження методів застосування ентомопатогенних нематод, але ці дослідження не враховували вплив механічного накачування та розпилення [10]. Вивчення цього аспекту є актуальною та необхідною задачею для наукових досліджень.

2.4. Гідродинамічне пошкодження біологічного матеріалу

Гідродинамічні впливи на клітини та організми були предметом досліджень і обговорень в біотехнологічній галузі [10-12]. Однак через різноманітність гідродинамічних умов, які досліджуються (наприклад, в'язкість, капілярні трубки, мішалки), і різні параметри, використовувані для оцінки впливу гідродинамічного напруження на клітини (такі як життєздатність, швидкість росту, потенціал відростання, вивільнення міжклітинного матеріалу, зміни швидкості киснювання, продуктивність метаболітів), а також різні параметри потоку, використовувані для зв'язку пошкодження клітини з умовами експерименту (наприклад, тангенціальне напруження, швидкість зсуву, середнє тангенціальне напруження стінки, питома потужність розсіювання, швидкість обертання пристрою, кінцева швидкість обертання пристрою, масштаб довжини), порівняння цих результатів напряму неможливе [10-12]. Зрозуміння основних механізмів гідродинамічного пошкодження клітин та організмів є критично важливим для прогресу в біотехнологічних дослідженнях.

У біотехнологічній літературі термін "зсув" використовувався для узагальнення впливів гідродинаміки на біологічний матеріал [1-5]. Проте, варто зауважити, що більшість потоків складаються з комбінації руху зсуву та розширення, який накладає на біологічний матеріал як тангенціальні (зсувні), так і нормальні напруги [11]. Існує гіпотеза, що саме нормальні напруги, що виникають при режимах течії з розтягуванням, можуть завдати більшої шкоди

клітині, ніж тільки тангенціальний потік при однаковому рівні розсіяної енергії.

Теоретично прості зсувні потоки характеризуються лініями струму, що перпендикулярні до градієнта швидкості та відсутністю завихреності, що призводить до перекидання тіла вздовж лінії потоку [11]. Це перекидання впливає на матеріальну лінію тіла так, що воно звертається вбік від основного напрямку потоку, і тіло залишається ледь деформованим. На відміну від цього, чисто розширені потоки мають лінії струму, які паралельні градієнту швидкості та відсутність завихреності (іншими словами, вони не перекидають тіло). У цьому випадку організми можуть сильно деформуватися, особливо якщо деформація стає значною, що може призвести до порушення структурної цілісності мембран організмів і навіть їх смерті [10,11].

У ранніх дослідженнях для оцінки чутливості клітин до зсуву використовувалися віскозиметри в умовах простого ламінарного зсувного потоку, і це було детально проаналізовано. Проте у біореакторах та системах розпилення потік має складну природу, яка включає як зсувні, так і розширюючі компоненти, і рухається дуже швидко.

Хоча ізолювати чистий розширений потік практично неможливо, вдалося виділити дві категорії потоків з високою розширеністю: квазістаціонарні та швидкоплинні перехідні потоки [10-12, 28-33].

Квазістаціонарні потоки, так як протилежні сопла, мають точку застою, де швидкість навколо цієї точки довгий час перебуває на високому рівні деформації. Швидкоплинні перехідні потоки мають обмежену область високої швидкості та деформації, існуючу протягом короткого часу. Потік через скорочення в більшості випадків належить до категорії швидкоплинних перехідних потоків [12, 28-33].

2.5. Властивості біопестицидів

Біопестициди – це суспензії, що складаються з індивідуальних частинок (тобто організмів), які випадково розповсюджуються в рідинному середовищі [10-12, 28-33].

З врахуванням основ механіки рідин, відомо, що додавання твердого тіла до рідини змінює характер потоку. Вже в 1906 і 1911 роках Ейнштейн розглядав, що ця зміна призводить до додаткового розсіювання енергії та збільшення в'язкості рідини [1-5]. Рівняння Ейнштейна було розроблено на основі декількох фундаментальних припущень, включаючи гладкість навколишнього середовища, значно менший розмір частинок порівняно із характерним масштабом руху, а також відсутність впливу стінок, що оточують систему (рівняння 2.1). [11].

$$\eta = \eta_s \left(1 + \frac{5}{2} \varphi\right) \quad (2.1)$$

де η – в'язкість суспензії;

η_s – в'язкість навколишньої рідини;

φ - об'ємна частка частинок.

На основі рівняння 2.1, коли об'ємна частка суспензії є дуже малою, у розбавленій суспензії можна вважати, що її в'язкість майже дорівнює в'язкості рідкого середовища.

Нижче наведено сценарій розпилення для визначення приблизної концентрації нематод в розпиленій суспензії [11].

Рекомендується наносити не менше 2,5E+9 нематод на гектар, щоб забезпечити належну кількість для контакту нематод з цільовими комахами. Рекомендують обприскувати від 750 до 1900 літрів суспензії на гектар, щоб досягти цілей у ґрунті. Для позакореневого внесення потрібні більші об'єми суспензії [11]. Вибір об'єму обприскування 2000 літрів на гектар є консервативним рішенням. Нарешті, об'єм нематоди можна оцінити шляхом моделювання нематоди у формі циліндра. Середня ширина і довжина нематоди

становить відповідно 25 і 558 мікрометрів. Таким чином, об'єм однієї нематої розраховується так:

$$V_{nem} = \frac{\pi(25\mu m)^2}{4} (558\mu m) = 273900\mu m^3 \quad (2.2)$$

А об'ємна частка дорівнює:

$$\varphi = \left(2.5 \times 10^9 \frac{nem}{ha}\right) \left(\frac{ha}{200L}\right) \left(\frac{100L}{m^3}\right) \left(2.739 \times 10^{-13} \frac{m^3}{nem}\right) = 0.0003 \quad (2.3)$$

З рівняння 2.1 видно, що 0,03% суспензія нематод призводить до збільшення в'язкості водяної суспензії на 0,075% [11,12]. Оскільки це збільшення в'язкості дуже мале, можна розумно припустити, що з точки зору зсувної в'язкості суспензія нематод практично не відрізняється від води як текучого середовища.

Враховуючи, що в об'ємній частці питома вага відрізняється на 0,03%, також розумно припускати, що густина суспензії є приблизно такою ж, як у воді. Проте важливо зауважити, що це припущення може бути недоцільним для високих концентрацій нематод [11,12].

Деякі біопестициди можуть проявляти неньютонівську поведінку, в якій в'язкість рідини залежить від швидкості деформації або швидкості зсуву. Звичайні значення швидкостей зсуву для різних процесів, таких як процеси змішування, потік в трубі та розпилення, знаходяться в діапазоні від 1 до 10⁴ секунд [11,12].

Перетікання неньютонівських розчинів через сопла може призвести до непередбачуваних змін, які можуть пошкодити біологічний контроль організмів. В'язкість може значно змінюватися залежно від швидкості зсуву для концентрованих суспензій, емульсій та полімерних рідин [11]. Однак, загалом, неньютонівське рівняння конститутивності може точно описувати реологічну поведінку більшості низькомолекулярних рідин. Таким чином, у гідродинамічному моделюванні розумно припускати, що дуже розбавлена

суспензія майже якісно схожа на ньютонівську рідину, і в'язкість суспензії залишається сталою [12].

2.6. Аналіз деформації організмів в умовах гідродинамічних потоків: перший крок у розв'язанні проблеми

Потоки можна розділити на три загальні категорії:

- зсувний потік;
- розтяжний потік;
- обертання твердого тіла.

Реальні потоки складаються з суперпозиції цих типів потоків. Більшість реальних потоків є комбінацією зсуву і розширення. Деформація тіла, зануреного в рідину, виникає внаслідок суперпозиції нормальних і тангенціальних сил від поля потоку, яке діє на поверхню тіла [12].

Деформація тіла математично описується як деформація на одиницю об'єму рідини, коли вона рухається вздовж лінії потоку. Частинки рухаються вздовж ліній струму, і це наближення надає вказівку на тип і силу сил, які діють на тіло під час потоку [12,13]. Однак важливо враховувати, що це наближення ґрунтується на припущенні, що деформація тіла співвідноситься з навколишньою рідиною (тобто деформація матеріалу еквівалентна деформації рідини). У реальності деформація тіла може бути неактивною. Це відбувається через відносне ковзання між тілом і рідиною, і орієнтація тіла може не відповідати лініям потоку, на які найсильніша деформація впливає [12,13]. Таким чином, це наближення надає найгірший сценарій, де тіло матиме деформацію, еквівалентну деформації рідини.

Для рідин напруга (τ , Па) пропорційна швидкості зміни деформації ($\dot{\gamma}$, s^{-1}), як бачимо в законі в'язкості Ньютона для ньютонівської рідини.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

де μ (кг м⁻¹ с⁻¹) – в'язкість рідини.

Тензор напруги (T) — це математичний оператор, який використовується для опису стану напруги в будь-якій даній точці поля течії. Для ньютонівської рідини (рівняння 2.5):

$$T = -\rho I + \mu 2D \quad (2.5)$$

де p (Па) – статичний тиск;

I – одинична матриця;

$2D$ – швидкість деформація тензора.

Для координат $2D$ визначається як,

$$2D = \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} & 2 \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} & \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} & 2 \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

де $u_x(x, y, z)$ (м/с), $u_y(x, y, z)$ (м/с) і $u_z(x, y, z)$ (м/с) є компонентами швидкості; і x (м), y (м) і z (м) — координати.

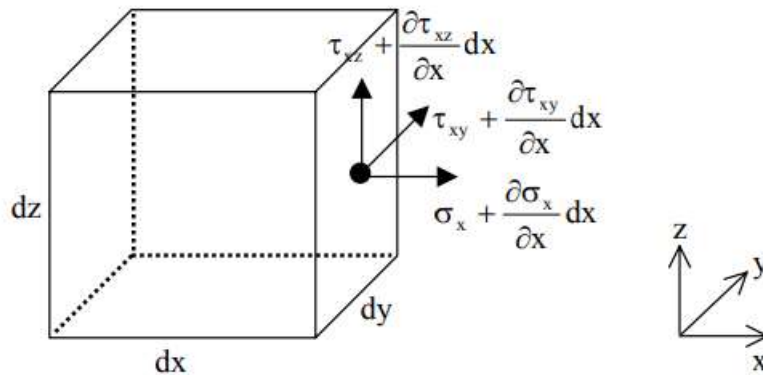


Рис. 2.1. Схема напружених потоків

Таким чином, напружені компоненти в тензор напруг (рівняння 2.5) приймає наступний вигляд.

$$\sigma_{xx} = -\rho + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{yy} = -\rho + 2\mu \frac{u_x}{\partial y} \quad (2.8)$$

$$\sigma_{zz} = -\rho + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.9)$$

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (2.10)$$

$$\tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (2.11)$$

$$\tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (2.12)$$

де σ_{xx} (Па), σ_{yy} (Па), і σ_{zz} (Па) – нормальні напруги в напрямках x , y , і z ; і τ_{xy} (Па), τ_{xz} (Па), τ_{yz} (Па) – напруги зсуву.

Для оцінки впливу гідродинамічного стресу на організм був використаний спеціальний експериментальний пристрій [12,13]. Цей пристрій містить два протилежні поршні, які рухаються в протилежних напрямках, просуваючи рідину через труби та скорочення, створюючи гідродинамічну напругу. Теоретичні аспекти цієї гідродинамічної напруги будуть розглянуті далі.

У межах поля скорочення потоку можна виділити три основні просторові зони:

- вище потоку від скорочення;
- в межах самого скорочення ;
- за потоком від скорочення.

В області вище потоку від звуження встановлюється типовий потік в трубі з параболічним профілем швидкості, який можна описати рівнянням для двовимірного осесиметричного потоку всередині труби [12,13].

$$u_z(r) = -\frac{1}{4\mu} - \frac{dp}{dz} (R^2 - r^2) \quad (2.13)$$

де dp/dz (Па/м) – градієнт тиску;

R (м) – радіус труби;

r (м) – координата в радіальному напрямку.

Джерелом енергії для руху рідини є рух поршня. Стосовно поля потоку безпосередньо перед поршнем, 99% повністю розвинуеного потоку досягається при діаметрі одного поршня перед поршнем [12,13]. Таким чином, протягом більшої частини довжини труби вище потоку від звуження, потік є повністю розвиненим.

Тип потоку (ламінарний або турбулентний) в трубі визначається числом Рейнольдса, яке залежить від розміру труби та швидкості руху рідини в ній. Наприклад, критичне число Рейнольдса для переходу від ламінарного до турбулентного потоку в трубах за нормальних умов складає 2300.

Потік у скорочення більш складний. Вхідний отвір із квадратним краєм призводить до поділу потоку в кутах, утворюючи переріз з малою прохідністю. Рідина повинна локально прискорюватися, щоб пройти через зменшену площу потоку, а потім дуже близько до скорочення потік сповільнюється, щоб заповнити отвір скорочення [12,13].

У зв'язку з цим в області скорочення виникають значні градієнти швидкості та тиску, що призводить до втрат механічної енергії. У верхніх шарах на стінках входу виникає опір від в'язкого тертя, і цей опір збільшується вздовж довжини скорочення [12-14]. На невеликих відстанях від входу до скорочення шар залишається ламінарним, але після певної відстані стає турбулентним. Число Рейнольдса (Re_z), при якому виникає перехід від ламінарного до турбулентного прикордонного шару, може бути розраховано на основі даних з плоскої пластини за допомогою відповідного рівняння [12-14].

$$Re_z = \frac{z_0 U_0 \rho}{\mu} \quad (2.14)$$

де z_0 (м) – відстань від переднього краю пластини;

U_0 (м/с) – середнім швидкість отвору;

ρ (кг/м³) – густина рідини.

Критичне число Рейнольдса для переходу від ламінарного до турбулентного прикордонного шару вздовж плоскої плити становить $3,2E+5$. В експериментах при звуженні потоку (наприклад, через діафрагми та гідравлічні сопла), передбачалася ламінарна природа потоку для всіх умов експерименту [14-18, 28-33].

Процес потоку через звуження є складним. Потік із звуженого входу стає струменевим, і рідина прискорюється, коли вона наближається до входу. Після цього відбувається розширення потоку, та рідина сповільнюється. В цьому процесі втрачається механічна енергія [15]. Ця втрата виникає внаслідок внутрішнього тертя рідини, яке зменшує кінетичну енергію частинок рідини, коли вони втрачають швидкість і не можуть подолати тиск у протилежному напрямку, що веде до оберненого потоку.

Динаміку потоку регулює нелінійна система рівнянь, включаючи рівняння неперервності, рівняння імпульсу та рівняння для ньютонівської рідини (наприклад, закон в'язкості Ньютона) [14-16]. Для простих потоків, таких як трубний потік, ця система рівнянь може бути розв'язана аналітично. Однак для складних потоків, які виникають через звуження, потрібні чисельні методи для їх розв'язання. Використання програм обчислювальної гідродинаміки дозволяє отримати наближену оцінку всього поля потоку, зокрема локальних параметрів, таких як градієнти швидкості.

Визначення кількості втраченої енергії виходить з концепції, що ця енергія переходить в кінетичну енергію, енергію роботи через стисливість рідини або втрату в'язкої енергії [16,17]. Таким чином, швидкість розсіювання енергії може бути корисним параметром для оцінки гідродинамічних умов, які можуть вплинути на пошкодження клітин (рівняння 2.15).

$$\frac{dQ_f}{dt\Delta V} = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u_x^2}{\partial x} + \frac{\partial u_y^2}{\partial y} + \frac{\partial u_z^2}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (2.15)$$

Швидкість розсіювання енергії можна розглядати як швидкість, з якою енергія віддається від елемента рідини безпосередньо перед тілом, яке знаходиться в контрольному об'ємі [16-18, 28-33]. Математично цю швидкість можна визначити як локальний вплив компонентів градієнта швидкості в межах поля потоку.

Висновки з Розділу 2

Отже, з урахуванням аналізу гідродинаміки і реології рідин у контексті складних потоків через звуження та їх впливу на пошкодження організмів можна зробити наступні висновки:

1. У лабораторних експериментах, де потік через звуження із гладкими стінками був ламінарним, відбувалася струменева рухливість рідини. Навіть при великих числах Рейнольдса (більше 10 4), ламінарний режим зберігався.

2. Потік через звуження відображає складну динаміку, з великими градієнтами швидкості та тиску у вихідній області, що призводить до великої в'язкої дисипації. Ця дисипація викликає втрату механічної енергії та може впливати на організми в контрольному об'ємі.

3. Для аналізу складних потоків, таких як потік через звуження, потрібні чисельні методи, зокрема програми обчислювальної гідродинаміки, які дозволяють оцінити гідродинамічні параметри.

4. Енергія розсіювання може бути корисним параметром для характеристики локальних гідродинамічних умов та їх впливу на організми. Цей параметр відображає втрату механічної енергії в рідині та може бути пов'язаний із пошкодженням клітин.

Отже, розуміння гідродинамічних особливостей складних потоків, таких як потік через звуження, може допомогти при оцінці можливого впливу на живі організми та розвитку методів для їх захисту в таких умовах.

Розділ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Аналіз впливу концентраційного потоку на гідродинамічне пошкодження ентомопатогенних нематод

Біологічні пестициди, які представляють собою живі організми, створюють особливі виклики в галузі їх виробництва, складності розробки формул та методів доставки, які відрізняються від традиційних хімічних пестицидів [16-18, 28-33].

Протягом останніх десятиліть відбулося значне розвиток у технологіях вирощування різних мікроорганізмів для біологічного захисту, включаючи бактерії, клітини тварин і рослин [16,18]. Однак у більшості великомасштабних виробництв для цих мікроорганізмів використовується спеціальні біореактори з механічним перемішуванням, де лопаті, що змішують рідини, можуть створювати гідродинамічну напругу, яка може впливати на ці мікроорганізми.

Деякі біологічні агенти мають більший розмір, ніж більшість клітин, і можуть бути вразливі до гідродинамічних сил. Використання існуючих методів розпилення є бажаним для доставки біопестицидів, оскільки виробники не завжди готові інвестувати в нове обладнання або робити радикальні зміни у своїх методах [17]. Для досягнення цієї мети важливо розуміти, як гідродинамічна напруга впливає на біологічні агенти в межах біореакторів та систем розпилення, і визначити оптимальні умови для зниження негативного впливу на ці біологічні агенти.

Коли спостерігається зменшення життєздатності біологічних агентів для боротьби зі шкідниками, це як правило, викликано механічними силами зсуву, які можуть бути результатом дії обладнання і його впливу. У біотехнологічних досліджах термін "зсув" регулярно використовується для пояснення будь-яких ефектів гідродинамічних сил на біологічний матеріал [17]. На практиці, більшість течій включають в себе як компоненти зсуву, так і розтягування, які впливають

на біологічні агенти шляхом тангенціальних (зсувних) та нормальних (розтягуючих) напруг.

Існує гіпотеза, що нормальні сили, створені режимом течії розтягування, можуть бути більш шкідливими для клітин, ніж чисто зсувний потік при тому ж рівні енергії розсіювання [17].

На практиці неможливо створити чистий екстенсійний потік, але застосування пристроїв для скорочення потоку дозволяє генерувати потоки з високим розширювальним компонентом. Використання пристроїв, які забезпечують або різкий, або плавний перехід потоку для більш точного відтворення характеристик потоку, які відчують клітини в обладнанні для біообробки [17,18].

Потік після звуження є геометрично простим, але поле потоку складне і містить як компоненти зсуву, так і розтягування. Більшість потоку розтягується найбільше в непосредній близькості до звуження, і тільки центральна лінія потоку має чисто розтягувальні характеристики [17,18]. В розпилювачах і подібних системах потік через звуження є поширеним режимом потоку (наприклад, у гідравлічних форсунках, клапанах та окремих частинах насосів). Таким чином, пристрої для скорочення потоку створюють добру модель для оцінки гідродинамічного впливу на біопроекти та обладнання для розпилення біологічних засобів боротьби зі шкідниками.

3.2. Кількісна оцінка пошкодження ентомопатогенних нематод

Процедура кількісної оцінки пошкодження нематодами ґрунтується на загально використуваних методах для визначення життєздатності нематод. Для цього розраховують кількість живих та мертвих нематод у певному зразку, використовуючи світловий мікроскоп [18-20]. Нематоди в стадії «молоді» легко розрізняються один від одного. Більшість видів нематод, рухаються

синусоїдально. Мертві нематоди залишаються нерухомими та виглядають прямими.

У кожному експерименті оброблену суспензію ретельно змішували, і взято підзразок об'ємом 100 мл. Цей підзразок додавали до приблизно 10 мл води в пластиковій чашці Петрі розміром 55 x 10 мм, щоб легко проводити огляд під світловим мікроскопом [18-20].

Рисунок 3.1 показує приклади живих, пошкоджених цілими, половинок і чвертинок нематод.

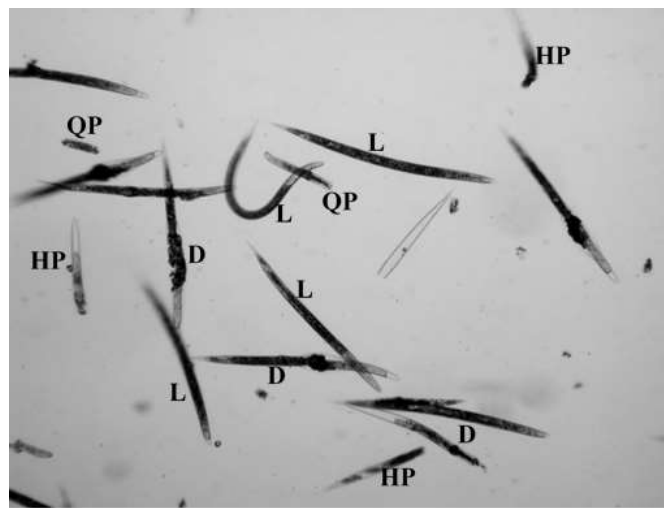


Рис. 3.1. Приклади нематод: живі (L), пошкоджені цілі (D), половинки (HP) та чвертинки (QP) нематоди використовується для кількісного визначення нематоди пошкодження після експериментального лікування.

В результаті проведених тестів деякі нематоди були пошкоджені, і деякі залишилися цілими. Була розроблена процедура, яка розподіляє пошкоджені нематоди на три групи за розміром (цілі, половинки і чвертинки), щоб підрахувати загальну кількість мертвих (пошкоджених) нематодів. Пошкоджену цілу нематоду визначали як мертву або як нематоду, яка була цілою або мала один з кінців ламаним [18-20]. Половина нематоди визначалася як частина, яка

була приблизно розміром половини цілої нематоди, а чверть нематоди була четвертою частиною довжини нематоди.

Зразки меншого розміру, де не було ясно, чи це були справжні нематоди чи якісь інші об'єкти, не включалися до підрахунку. Прозорі оболонки також не враховувалися [18-20].

Відносну ураженість нематодами (RD, %) визначали, реєструючи кількість живих, пошкоджених цілими, половинок і чвертинок нематод у кожному зразку і розраховуючи її за допомогою відповідного рівняння.

$$RD = 100 - \left(\frac{L}{L+D+\frac{HP}{2}+\frac{QP}{4}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

$$RV = 100 - RD \quad (3.2)$$

Відносна життєздатність нематод (RV, %) – це просто частина зразка, яка не була досліджена пошкоджений (тобто живий) і був обчислений за рівнянням 3.1.

3.3. Дослідження гідродинамічних характеристик потоку вздовж нематоди в межах різкого скорочення

Поле потоку в межах різкого скорочення було досліджено докладно за допомогою чисельних методів. У цих дослідженнях полімери в спіралі і клітинні мікроносії моделювалися як частинки, і суспензія розглядалася як нерозривні явища [18-20].

Для чисельного моделювання також розумно було вважати, що розбавлена суспензія нематод є нерозривними явищами [18]. Однак, оскільки нематода має вузьке, подовжене тіло, відмінне від приблизно сферичної форми клубка або клітини, більш відповідною моделлю для нематоди є циліндр, а не частинка. Більше того, можна припустити, що нематоди рухаються вздовж ліній струму з повністю витягнутими тілами, зорієнтованими вздовж потоку, і що немає

відносного ковзання між нематодами та рідиною навколишнього середовища [18].

Це дослідження спрямоване на розширення робіт, проведених раніше в галузі гідродинамічних досліджень, що стосувались тваринних і рослинних клітин, шляхом оцінки гідродинамічних напруг, таких як розтягування і зсув. В час потоку в межах різкого скорочення, яке діє вздовж поверхні нематоди, може спричинити її деформацію.

Для двовимірного осесиметричного потоку всередині труби тензор швидкості деформації (2D) визначається таким чином,

$$2D = \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial u_r}{\partial r} & 0 & \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \\ 0 & 2 \frac{\partial u_r}{r} & 0 \\ \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} & 0 & 2 \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

де $u_r(r, z)$ (м/с) – радіальна складова швидкості;

$u_z(r, z)$ (м/с) – осьова швидкість компонент;

r (м) і z (м) радіальне та осьове положення відповідно.

Таким чином, для двовимірний осесиметричний потік всередині труби, компоненти напруги напруги тензор (рівняння 2.5) приймає наступний вигляд,

$$\sigma_{rr} = -\rho + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -\rho + 2\mu \frac{u_r}{r} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{zz} = -\rho + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (3.6)$$

$$\tau_{zr} = \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \quad (3.7)$$

де σ_{rr} (Па), $\sigma_{\theta\theta}$ (Па) і σ_{zz} (Па) нормальні напруги в напрямках r, θ і z , відповідно; τ_{zr} (Па) – напруга зсуву

Швидкість розсіювання в'язкої енергії (dQ_f/dt , Вт) на одиницю об'єму (ΔV , м³) для двовимірний осесиметричний потік у трубі обчислюється за наступним рівнянням.

$$\frac{dQ_f}{dt\Delta V} = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u_r^2}{\partial r} + \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 + \frac{\partial u_z^2}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

Для впливу на суспензії ентомопатогенних нематод застосовувався пристрій оберненого потоку поршнів (рис. 3.2, 3.3, 3.4).



Рис. 3.2. Пристрій протилежного потоку поршнів, що використовується для проведення експериментів з оцінки вплив гідродинамічного стресу на пошкодження нематодами.

Пристрій складається з двох труб високого тиску (нержавіюча сталь, діаметр 1,45 см, довжина 35,56 см), які разом з діафрагмою (нержавіюча сталь, діаметр отвору 0,0635 см, товщина пластини 0,1778 см) утворюють колообертовий рух [18-20]. З'єднані два гідроциліндри зі шлангами та двома трубками високого тиску з поршнями, з'єднаними з вставкою діафрагми показані (рис. 3.2). Гідравлічний двигун не показаний.

Два поршні (нержавіюча сталь, діаметр 1,44 см) (обладнання високого тиску) управлялися гідравлічною системою, що змінює фазу, таким чином, що один поршень рухається вперед, примушуючи суспензію ентомопатогенних нематод пройти через трубу та отвір, інший поршень витягується з тією самою швидкістю назад у колекційний бік [18-20].

Довжина ходу поршня становить 30,48 см. Гідравлічна система складається з двигуна потужністю 5 кВт та гідравлічного насоса змінного об'єму з компенсацією тиску. Вся гідравлічна система встановлена на масляний резервуар об'ємом 56,8 л і включає подвійний клапан для регулювання потоку, який керується важелем клапана і зворотний фільтр з розміром пор 50 мкм. Гідравлічна насосна система приводила два гідравлічні циліндри з боку налагодження [19].

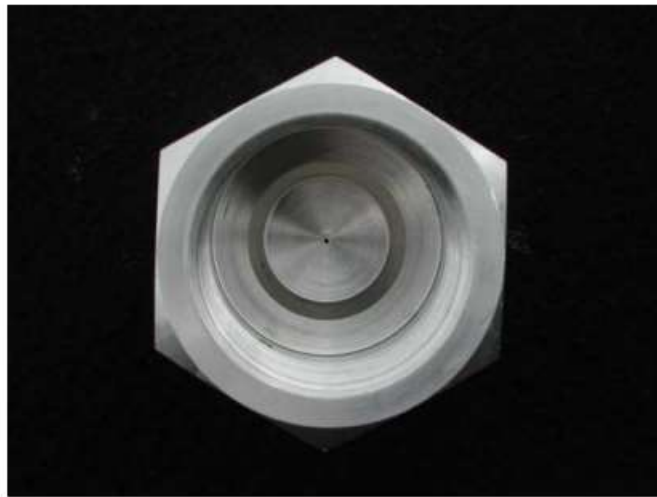


Рис. 3.3. Вставка діафрагми, яка використовується для оцінки ефекту потоку через різке скорочення в пристрої потоку з протилежними поршнями. Діаметр отвору 0,635 мм.

Перед кожним випробуванням швидкість поршня вимірювалася за допомогою цифрового тахометра, і будь-які корекції швидкості поршня вносилися на цей раз. Всі випробування проводились в діапазоні від 5 до 25 см/с

обертання поршня, що відповідало об'ємній швидкості потоку від 8,3 до 41,3 см³/с [19].

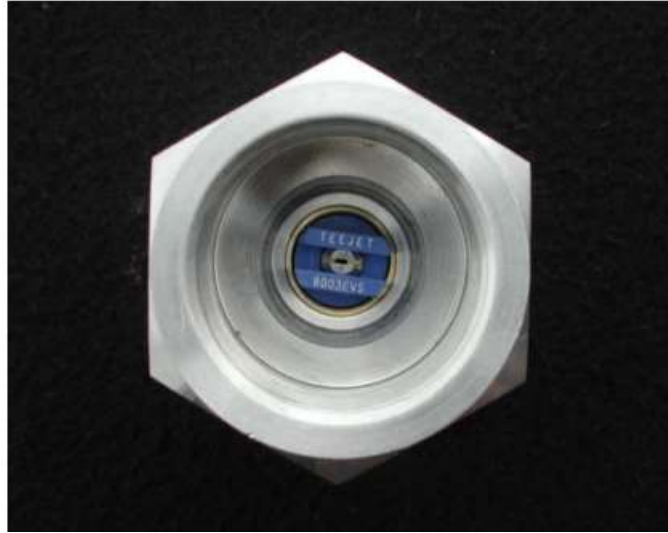


Рис. 3.4. Вставка діафрагми, яка використовується для оцінки впливу потоку через гідравлічні сопла в пристрої протилежного потоку поршнів. Прокладка була спеціально виготовлена для утримання сопла в діафрагмі

Таблиця 3.1 надає узагальнену інформацію про експериментальні методи обробки. Ентомопатогенні нематоди піддавалися одноразовому впливу, проходячи через скорочення. Кожне випробування на кожній швидкості потоку повторювалося двічі.

Загальний час включає в себе час для навантаження, проведення випробувань і вивантаження зразків та становив менше 10 хв.

Таблиця 3.1. Експериментальні умови та вимірне відносне пошкодження після протікання через скорочувальний проточний пристрій

Швидкість поршня (см/с)		5	7	9	11	13	15	17	19	21	25
Об'ємна витрата (см ³ /с)		8.26	11.56	14.87	18.17	21.48	24.78	28.09	31.39	34,69	41.30
число Рейнольдса, вхідний отвір		7,21E+2	1,01E+3	1.30E+3	1,59E+3	1,88E+3	2,16E+3	2,45E+3	2,74E+3	3,03E+3	3,61E+3
число Рейнольдса, скорочення		1,65E+4	2.30E+4	2,97E+4	3,63E+4	4,29E+4	4,93E+4	5,60E+4	6,26E+4	6,92E+4	8,25E+4
Відносна пошкодження (%) <i>1,2,3</i>	<i>X</i>	0,58	0,08	0,89	12,00	49,65	30,47	66,35	56,66	82,76	93,53
	<i>H</i>	0,00	0,15	0,68	1,62	20,75	30,33	92,93	79,23	89,91	96,12
	<i>C</i>	0,00	0,06	0,43	0,72	0,71	4,58	2,53	23,23	22,35	50,64
	<i>S</i>	_4	_	4,97	_	5,65	_	56,08	_	91,60	_

Пошкодження від нематод було визначено кількісно шляхом підрахунку кількості живих і мертвих (цілих і шматочків) EPN, і відносний збиток був обчислений згідно з рівнянням 3.1.

Висновки з Розділу 3

У ході нашого дослідження ми зосередилися на вивченні гідродинамічного впливу на біологічних агентів, які використовуються в якості біопестицидів. Біологічні пестициди представляють значний інтерес у землеробстві, проте їх виробництво та доставка створюють особливі виклики через використання живих організмів.

Зокрема, наше дослідження показало, що гідродинамічні сили, які виникають в межах обладнання для біопроектів та систем розпилення, можуть впливати на біологічні агенти, використовувані для боротьби зі шкідниками. Біологічні агенти можуть піддаватися деформації під дією різних гідродинамічних напруг, і це може призводити до зниження їхньої життєздатності.

Наша робота допомагає розуміти, як гідродинамічні сили впливають на біологічних агентів в межах біореакторів та систем розпилення. Ми також визначили, що нормальні сили розтягування можуть бути особливо шкідливими для біологічних агентів, і це може враховуватися при розробці нових систем для їх розпилення.

Для практичних застосувань важливо знати оптимальні умови для зменшення негативного впливу гідродинамічних сил на біологічні агенти. Такий аналіз може допомогти розробити ефективніші методи вирощування та доставки біологічних пестицидів, покращуючи їхню ефективність у боротьбі зі шкідниками та сприяючи збільшенню врожаю у сільському господарстві.

Розділ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЇХ АНАЛІЗ

Перед тим як досліджувати можливість створення нових систем доставки біопестицидів, необхідно проаналізувати обмеження існуючого обладнання. Більшість систем нанесення рідини використовують гідравлічні сопла, такі як плоский вентилятор або конус, де рідина під тиском проходить через невеликий отвір, щоб утворити краплі [20-24]. Однак це обладнання спочатку розроблялося для хімічних пестицидів і може не підходити для застосування біологічних агентів.

Під час течії через гідравлічне сопло виникають різні гідродинамічні напруги, які можуть пошкодити біологічні агенти. Тому ми провели це дослідження, щоб оцінити вплив двох типів гідравлічних сопел (плоский вентилятор і конус) на пошкодження ентомопатогенних нематод.

Ми припускали, що вихідний отвір плоского вентиляторного сопла, який має приблизно еліптичну форму, створює більше гідродинамічної напруги та, відповідно, призводить до більшого зниження життєздатності ентомопатогенних нематод порівняно з круглим вихідним отвором конусних сопел [20-24, 28-33].

Конкретні цілі цього дослідження включали в себе кількісну оцінку відносної життєздатності ентомопатогенних нематод після проходження потоку через кожен тип сопла в експериментальному пристрої, імітацію внутрішнього потоку всередині кожного типу сопла за допомогою чисельних методів та порівняння експериментальних результатів з важливими параметрами потоку, отриманими з чисельного моделювання насадок [20-24, 28-33]

4.1. Експериментальний проточний пристрій

Ми виконали експерименти з використанням пристрою протилежного потоку поршня, який був описаний у розділі 3. Єдине відміннось у нашому експерименті полягала у тому, що ми використовували діафрагму з більшим

отвором з нержавіючої сталі (діаметр отвору 1,45034 см, товщина пластини 0,1778 см). Ця сталева прокладка була спеціально створена для утримання пластикових корпусів форсунок. Перед кожним тестом ми вимірювали швидкість поршня за допомогою цифрового тахометра та налаштовували її відповідно до бажаної швидкості поршня, яка була в межах 0,04 см/с ($SE = 0,001$ см/с) [22-24].

Випробовували три різні гідравлічні форсунки:

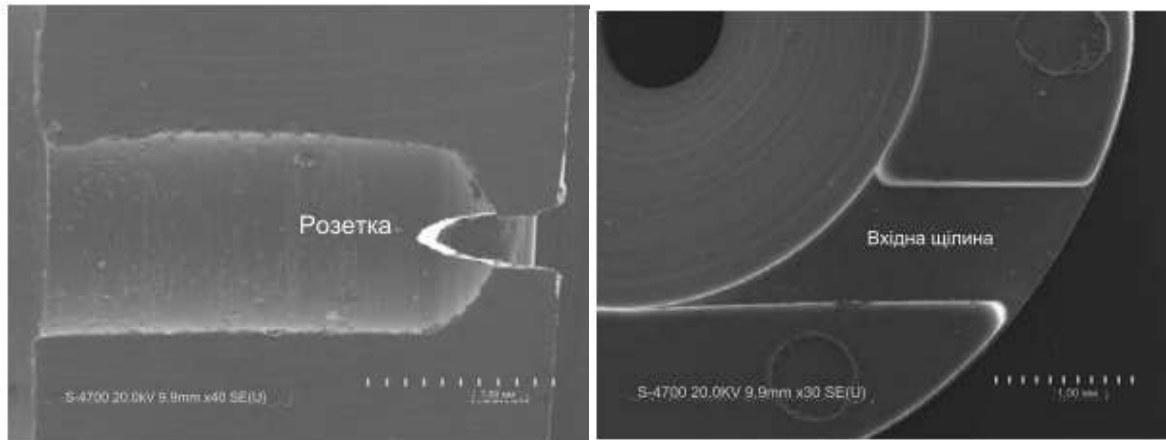
- стандартний плоский вентилятор;
- порожнистий конус;
- повний конус.

Перед кожним тестуванням ретельно перемішували суспензію ентомопатогенних нематод і завантажували приблизно 50 мл цієї суспензії в пристрій між поршнем і насадком. Тести проводилися при різних швидкостях поршня: 13, 17 і 21 см/с, відповідно до об'ємних витрат 21,5, 28,1 і 34,7 см³/с відповідно. Кожний тест при кожній швидкості поршня був проведений двічі для кожного типу сопла. Загальний час на завантаження, виконання тесту і вивантаження зразка становив менше 10 хвилин [22,24].

Проведений статистичний аналіз даних про відносну життєздатність ентомопатогенних нематод. Дані були перетворені, оскільки більшість з них знаходилася в діапазоні від 70% до 100%. Трансформація арксинусом допомогла зменшити дисперсію даних [23]. Аналіз проводився за допомогою чотирифакторного ANOVA з підвибіркою для видів ентомопатогенних нематод, типу сопла і швидкості потоку. Ми використовували методику для обробки та підрахунку квадратів сум, включаючи суми квадратів для підвбірок і залишків. Щоб порівняти окремі випробування, ми використовували метод найменших значущих відмінностей на рівні значущості 0,05 [24,25, 28-33].

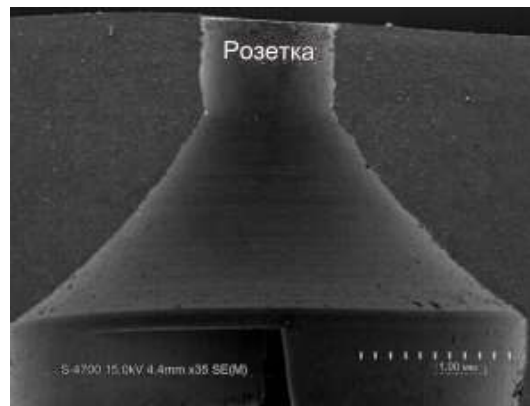
Внутрішні структури обох гідравлічних форсунок з однаковими об'ємними потоками (плоский вентилятор XR8001VS та порожнистий конус TXA8001VK)

були змодельовані за допомогою програми 3d компас версії. Кожна з форсунок була розділена навпіл, і їхні внутрішні розміри були виміряні за допомогою цифрового штангенциркуля. Далі проводилася мікрофотографія поперечних перерізів кожної форсунки за допомогою скануючого електронного мікроскопу холодного поля (CFE-SEM) моделі Hitachi S-4700. Зображення мікрофотографій зображено на рисунку 4.1, і на них показані поперечні перерізи кожної форсунки.



а

б



в

Рис. 4.1. Мікрофотографії скануючого електронного мікроскопа холодного поля, поперечного перерізу кожного сопла, що показує: а) область еліптичного вихідного отвору плоского вентиляторного сопла; б) вхідну щілину порожнистого конусоподібне сопло; в) вихрову камеру та область круглого вихідного отвору порожнистого конуса.

Схема внутрішньої будови наконечника форсунки XR8001VS наведена на рисунку 4.2. Для моделювання використовувалася декартова система координат з віссю z у напрямку вісі.

Геометрія форсунки складається з трьох циліндрів, які перекривають один одного і мають такі радіуси (R , мм) і довжини (L , мм): $R_1 = 2,365$ мм, $L_1 = 3,5$ мм, $R_2 = 1,78$ мм, $L_2 = 1,5$ мм, $R_3 = 0,52$ мм, і $L_3 = 2,0$ мм. Сферу радіусом $0,5279$ мм поділено площиною, розташованою на відстані $0,091$ мм від центру сфери.

Менша частина кулі була накладена на кінець третього циліндра. Вилучено клин (висота $0,417$ мм, основа $0,286$ мм) від сфери для створення вихідного отвору, який має приблизно еліптичну форму [24-26]. Розміри головної та другорядної осей цього еліптичного отвору становлять $0,52$ і $0,286$ мм відповідно.

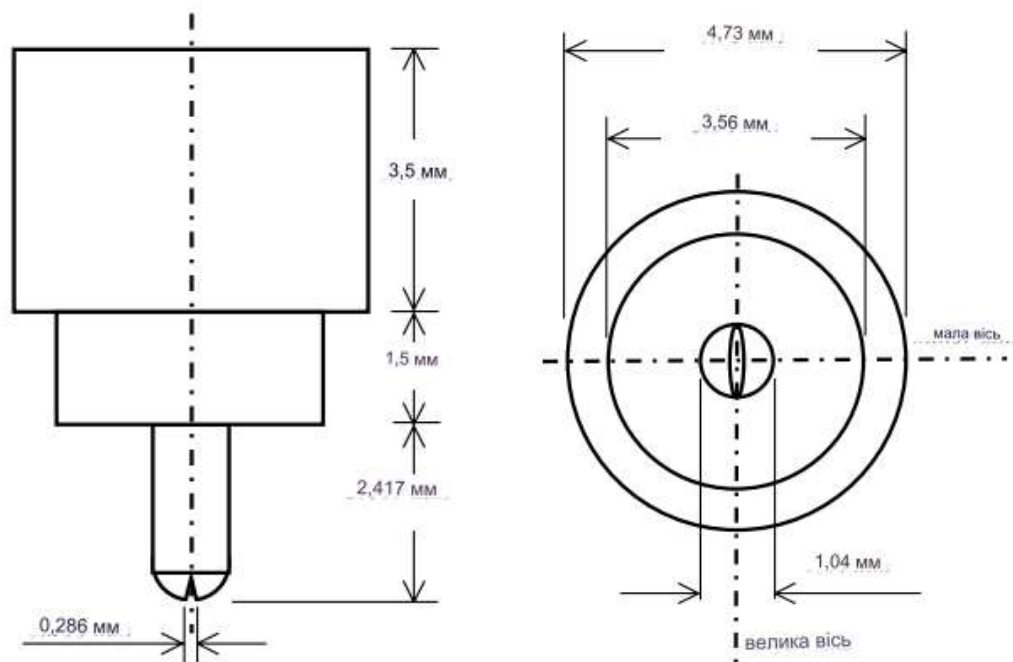


Рис. 4.2. Принципова діаграма плоскої вентиляторної форсунки системи обприскування XR8001VS

Сітка, яка використовувалася для моделювання форсунки XR8001VS у програмі FLUENT, наведена на рисунку 4.3. Об'ємна сітка складається з

шестигранної та тетраедричної сітки. Об'єми сітки різноманітні з різним об'ємом в околицях центральної осі форсунки та вихідного отвору.

Був зроблений компроміс між роздільною здатністю моделі (тобто загальною кількістю обчислювальних вузлів) і часом обчислення, тому було проаналізовано кілька різних сіткових схем для визначення оптимального незалежного від сітки рішення [24]. У загальній сумі у моделі було використано 159 вузлів, з яких 70% розташовано в області вихідного отвору. Розмір сітки в області вихідного отвору становить приблизно 10 мкм, що є приблизно вдвічі менше, ніж середній розмір ентомопатогенних нематод.

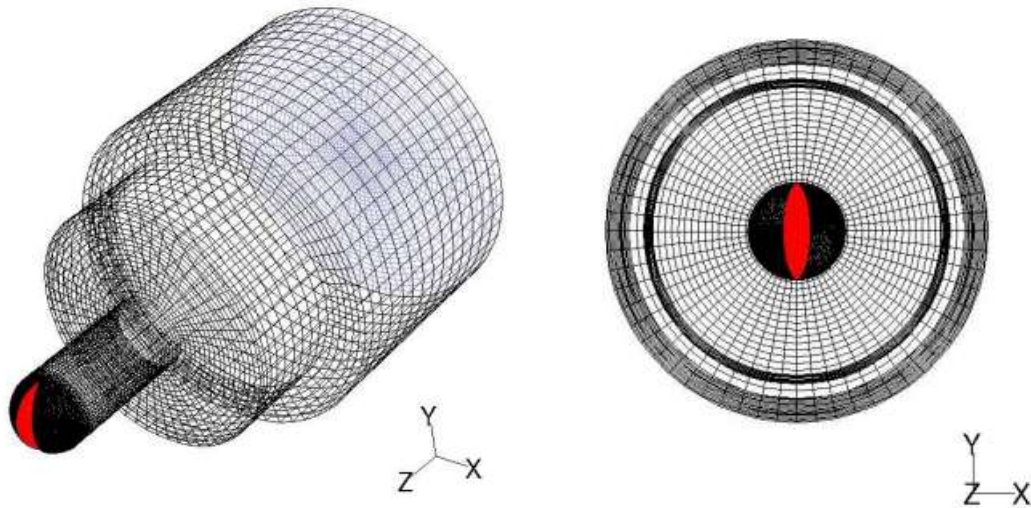


Рис.4.3. Сітка плоскої вентиляторної насадки XR8001VS, яка використовується у FLUENT для імітації поля потоку.

Внутрішня структура насадки форсунки ТХА8001VK зображена на рисунку 6.4. В даному моделюванні використовувалася декартова система координат з осями x , y та z .

Порожнистий конус складається з двох щілин (ширина 0,86 мм, висота 0,90 мм), через які рідина подається в вихрову камеру форсунки. Верхню частину вихрової камери формує циліндр (радіус 2,34 мм, довжина 1,03 мм), який переходить в інший циліндр (радіус 0,5435 мм, довжина 0,9 мм), де розміщений

круглий вихідний отвір. Геометрія воронки створювалася шляхом об'єднання шести вирізаних частин з вимірами верхньої і нижньої частин воронки, які були визначені з мікрофотографій (рис.4.1в), з вимірюваннями нахилу вздовж поверхні воронки [24,25].

Для полегшення умов обтікання контрольний об'єм домену форсунки було розширено, щоб врахувати потік між зовнішнім корпусом форсунки (радіус 4,1 мм) і самим корпусом форсунки. Вище вихрової камери форсунки розташована пробка (радіус 3,3 мм), щоб забезпечити, що потік потрапляє в вихрову камеру тільки через дві щілини.

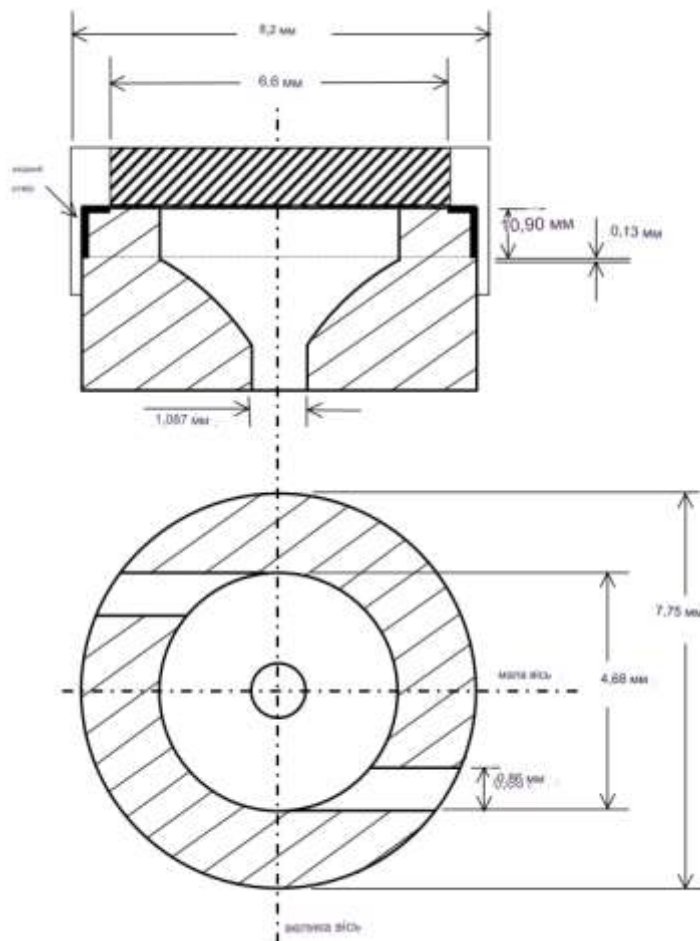


Рис. 4.4. Принципова діаграма системи розпилення ТХА8001VK з порожнистим конусом насадка.

Сітка для моделювання форсунки ТХА8001VK, представлена на рисунку 4.5. Об'ємна сітка включає в себе як шестигранні, так і тетраедричні елементи. Об'єми сітки мають нерівномірну концентрацію в околицях воронки та вихідного отвору. Загалом в моделі було використано 190 вузлів, із яких 78% розташовані в області воронки та вихідного отвору [25]. Розмір сітки в області вихідного отвору становить приблизно 20 мкм, що приблизно вдвічі менше за середній розмір ентомопатогенних нематод.

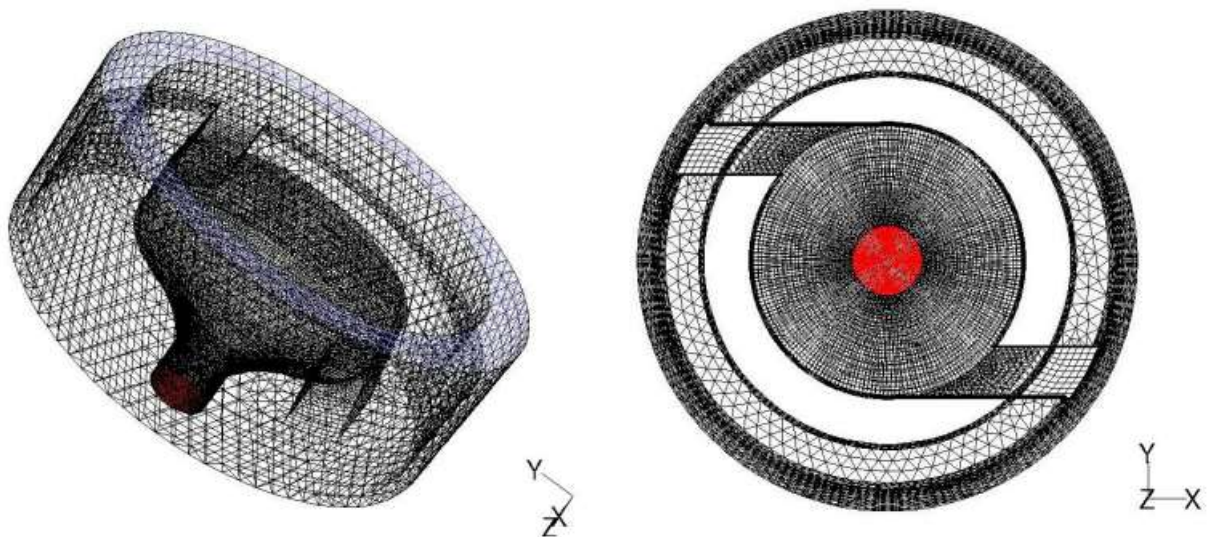


Рис. 4.5. Сітка сітки порожнистого конічного сопла ТХА8001VK, що використовується для імітації поля потоку.

У цих обчисленнях були враховані певні припущення. Рідина вважалася некомпресованою, нев'язкою, і обтікаючою стінки. Також передбачалося, що всі експерименти проводилися в ламінарному режимі. Граничні умови включали рівномірний профіль швидкості на вході в домен і витік з домену на виході. Рідке середовище вважалось водою за стандартних атмосферних умов [25,26]. Параметри розв'язування, такі як тиск, рівняння та недостатня релаксація, були встановлені за замовчуванням.

Моделювання поля потоку для кожного сопла було проведено при кожній з експериментальних умов щодо швидкості потоку. Також, користувацька функція була створена для обчислення швидкості розсіювання енергії (рівняння 2.15) на основі інформації про поле потоку. Це передбачало, що вся кінетична енергія, що розсіюється рідиною, буде повністю використана [25,26, 28-33]. Для вентилятора з плоским вихром, значення швидкості розсіювання енергії були виміряні від обчислювальних вузлів на перетинах на відстані 0,0417 мм від кінчика вихідного отвору, що утворює еліптичну поверхню отвору.

Для порожнистого конусу, значення швидкості розсіювання енергії були виміряні від обчислювальних вузлів на круглій поверхні вихідного отвору для обчислення середньої швидкості розсіювання енергії. У обох випадках не враховувалася енергія швидкості дисипації від вузлів, які знаходяться на відстані приблизно 31,75 мкм від стінки форсунок, оскільки значення біля стінки були значно вищими, ніж обсяговий потік за припущенням про відсутність зносу на стінці, і це спотворювало середні значення [26,27]. Відстань 31,75 мкм представляє приблизно одну еквівалентну ширину ентомопатогенних нематод.

4.2. Результати дослідження відносної життєздатності ентомопатогенних нематод у контексті обробки сопла

Загальні зміни тиску, що виникають внаслідок потоку рідини всередині форсунок, були значно нижчі, ніж тиск, зазначений для попередніх досліджень нематод. Це свідчить про те, що у цьому дослідженні під час потоку рідини не відбуваються значні перепади тиску, які можуть бути шкідливими для нематод [27-33].

Також важливо відзначити, що рідина виходить з отвору сопла залишаючись в рідкому континуумі, що сприяє збереженню цілісності нематод і уникненню утворення крапель.

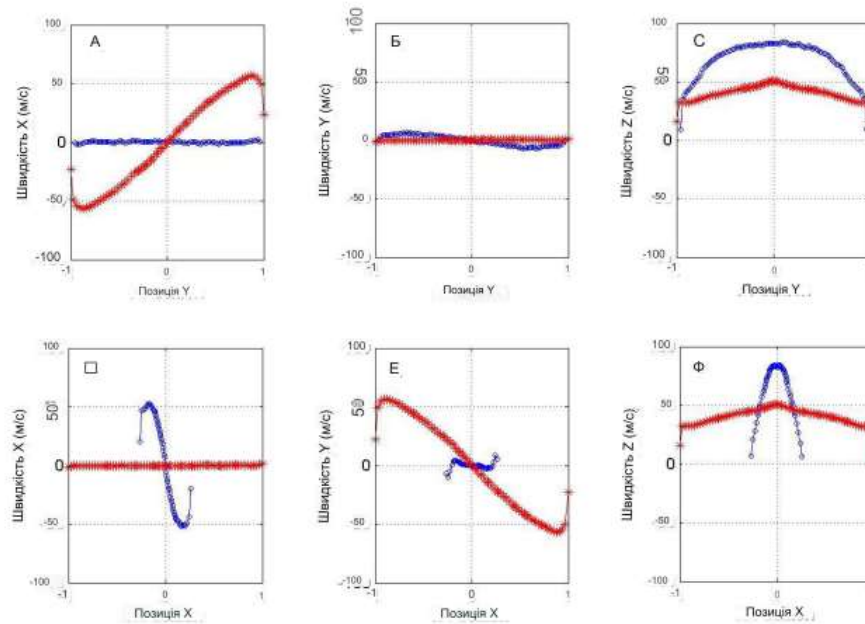


Рис. 4.6. Результати моделювання компонентів x-, y- та z-швидкості (м/с) на великій (A-C) і малій (D-F) осях вихідного отвору, відповідно, плоского вентилятора XR8001VS (—o—) і форсунки ТХА8001VK з порожнистим конусом (—*—) з об'ємною швидкістю потоку 34,7 см³/с. Положення у (велика вісь) і положення x (мала вісь) графіків були нормалізовані за діаметром вихідного отвору ТХА8001VK.

Також важливим фактором був тип насадки. Різні типи насадок впливають на гідродинаміку усередині форсунок, і це впливає на відносну життєздатність нематод.

Об'ємні швидкості потоку також мали важливий вплив на відносну життєздатність [26, 28-33]. Вони різнилися для кожного експерименту, і це впливає на тиск та потік всередині форсунок.

Важливо відзначити, що дослідження показали статистично значущі різниці між різними видами нематод та умовами обробки. Це дає можливість обирати оптимальні умови для застосування конкретного виду нематод у практиці з метою максимізації їхньої ефективності.

Таблиця 4.1 Дисперсійний аналіз відносної життєздатності нематод після обробки різними насадками види в різних гідродинамічних умовах.

Джерело	Ступені свободи	Сума квадратів	Середні квадрати	F тест
Види нематод	$a - 1 = 3$	0.5917	0.1972	86.87
Тип насадки	$b - 1 = 2$	0.9162	0.4581	201.81
Швидкість потоку	$c - 1 = 2$	0.9622	0.4811	211.94
Тип насадки	$(a - 1)(b - 1) = 6$	0.3118	0.0520	22.89
Швидкість потоку	$(a - 1)(c - 1) = 6$	0.2791	0.0465	20.48
Тип форсунки х Швидкість потоку	$(b - 1)(c - 1) = 4$	0.4649	0.1162	51.19
Тип сопла х Швидкість потоку	$(a - 1)(b - 1)(c - 1) = 12$	0.2817	0.0235	10.35
Помилка	$a b c (r - 1) = 36$	0.0818	0.0023	
Субпроби	$r a b c (s - 1) = 144$	0.1517	0.0010	
Всього	$r s a b c - 1 = 215$	4.0414		

В таблиці 4.1. проведений дисперсійний аналіз впливу різних насадків та гідродинамічних умов на відносну життєздатність чотирьох видів ентомопатогенних нематод.

Додатково, результати показали, що насадка FL5-VS була більш ефективною за інші, такі як XR8001VS і TXA8001VK, і при цьому не призводила до значного зниження відносної життєздатності нематод. Фактично, вона майже не вплинула на відносну життєздатність нематод (-0,01%). Отже, вибір правильної насадки може бути важливим для досягнення найкращих результатів при обробці різних видів ентомопатогенних нематод [28-33].

Вплив конструкції насадок на характеристики потоку зазначено, що різні насадки мають різні внутрішні форми, які впливають на швидкість та напрямок руху рідини. Наприклад, віялова насадка генерує тонкий лист з рідкісним віяловим малюнком, тоді як конусна насадка створює порожнистий конус у

вихідному отворі. Моделювання потоків показало відповідні відмінності в швидкості та напрямку руху рідини для різних насадок.

На рисунку 6.7 показано результати моделювання швидкості розсіювання енергії в FLUENT для двох видів насадок: XR8001VS і ТХА8001VK при об'ємних витратах рідини на рівні $34,7 \text{ см}^3/\text{с}$. Насадка XR8001VS відзначається високим рівнем енергії швидкості дисипації по всій еліптичній поверхні, що означає, що рідина втрачає свою енергію дуже швидко [28-33]. Насадка ТХА8001VK, натомість, має порівняльно низький рівень швидкості дисипації, особливо біля стінки сопла.

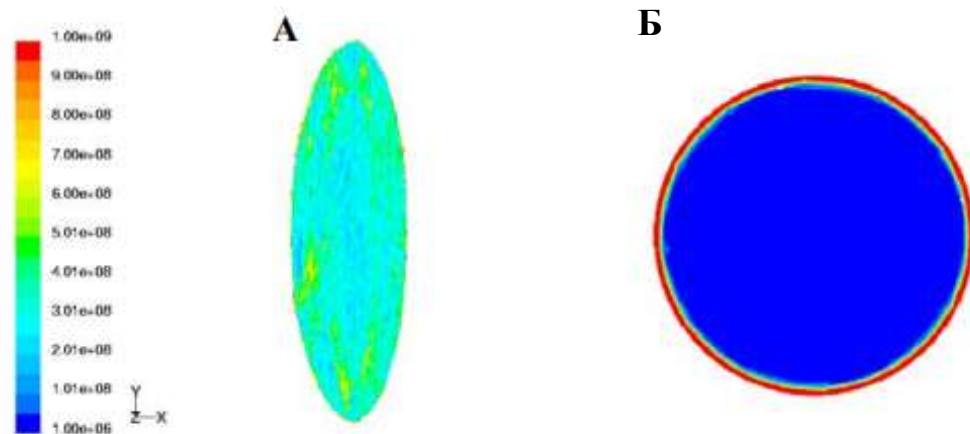


Рис. 4.7. Результати моделювання швидкості розсіювання енергії ($\text{Вт}/\text{м}^3$) від поверхонь вихідного отвору: А) плоского вентилятора XR8001VS; В) порожнистих конусних форсунок ТХА8001VK при об'ємній швидкості потоку $34,7 \text{ см}^3/\text{с}$.

Рекомендується, щоб рівень швидкості розсіювання енергії в межах компонента обладнання був менший за $1\text{E}+8 \text{ Вт}/\text{м}^3$, щоб запобігти гідродинамічному пошкодженню ентомопатогенних нематод. Для обох насадок, середні значення швидкості розсіювання енергії в областях вихідних отворів сопел значно перевищують цей поріг [28-33].

На рисунку 4.8 наведено середні значення швидкості розсіювання енергії в областях вихідних отворів для обох насадок XR8001VS і ТХА8001VK порівняно зі спостережуваною відносною життєздатністю чотирьох видів ентомопатогенних нематод. З відповідності між швидкістю розсіювання енергії та пошкодженням нематодами, виходить, що насадка XR8001VS викликає великі пошкодження для всіх видів нематод [28-33]. Такі пошкодження спостерігаються внаслідок високих значень швидкості розсіювання енергії в областях вихідних отворів цієї насадки.

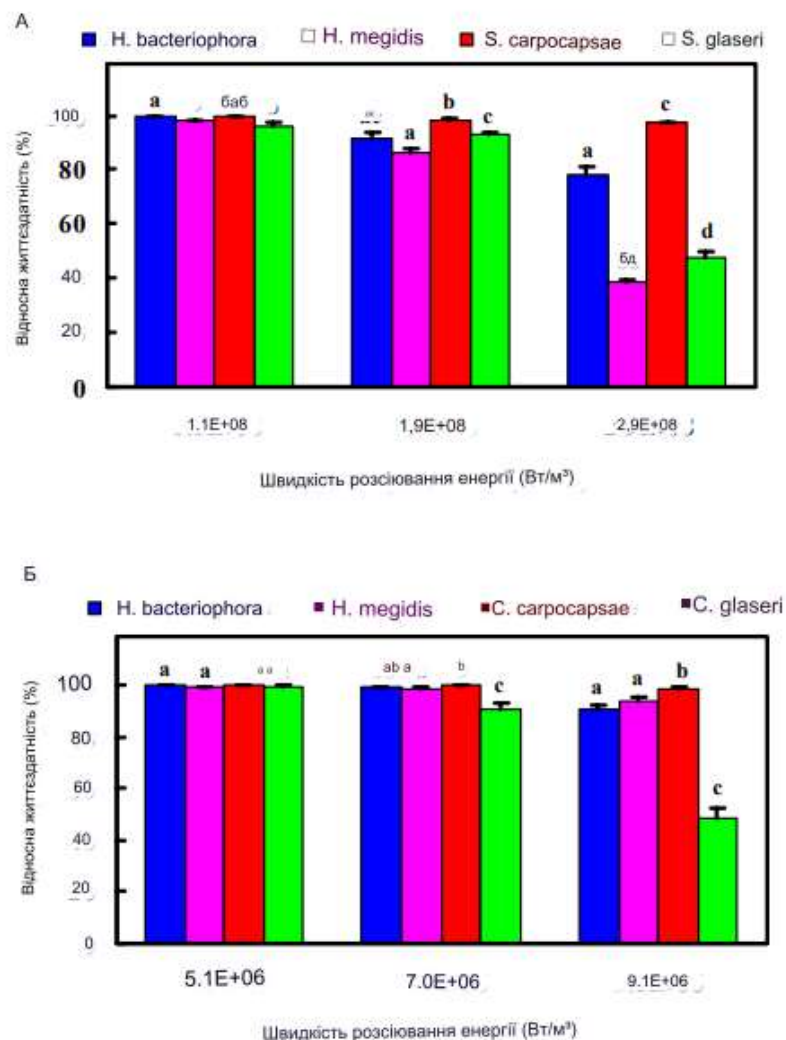


Рис. 14. Спостережувана середня відносна життєздатність (%): А) XR8001VS плоский вентилятор; Б) порожнисті конусні насадки ТХА8001VK.

За порівнянням результатів для обох насадок, видно, що вищий рівень швидкості розсіювання енергії для XR8001VS призводить до значних пошкоджень нематодами, які не спостерігаються для насадки ТХА8001VK. Ці різниці у швидкості розсіювання енергії можуть пояснювати загальне зниження життєздатності нематод після обробки насадкою XR8001VS порівняно з ТХА8001VK [28-33].

Стає зрозуміло, що різниця у рівнях розсіювання енергії між форсунками XR8001VS і ТХА8001VK пояснюється різницею в потокових характеристиках обох насадок.

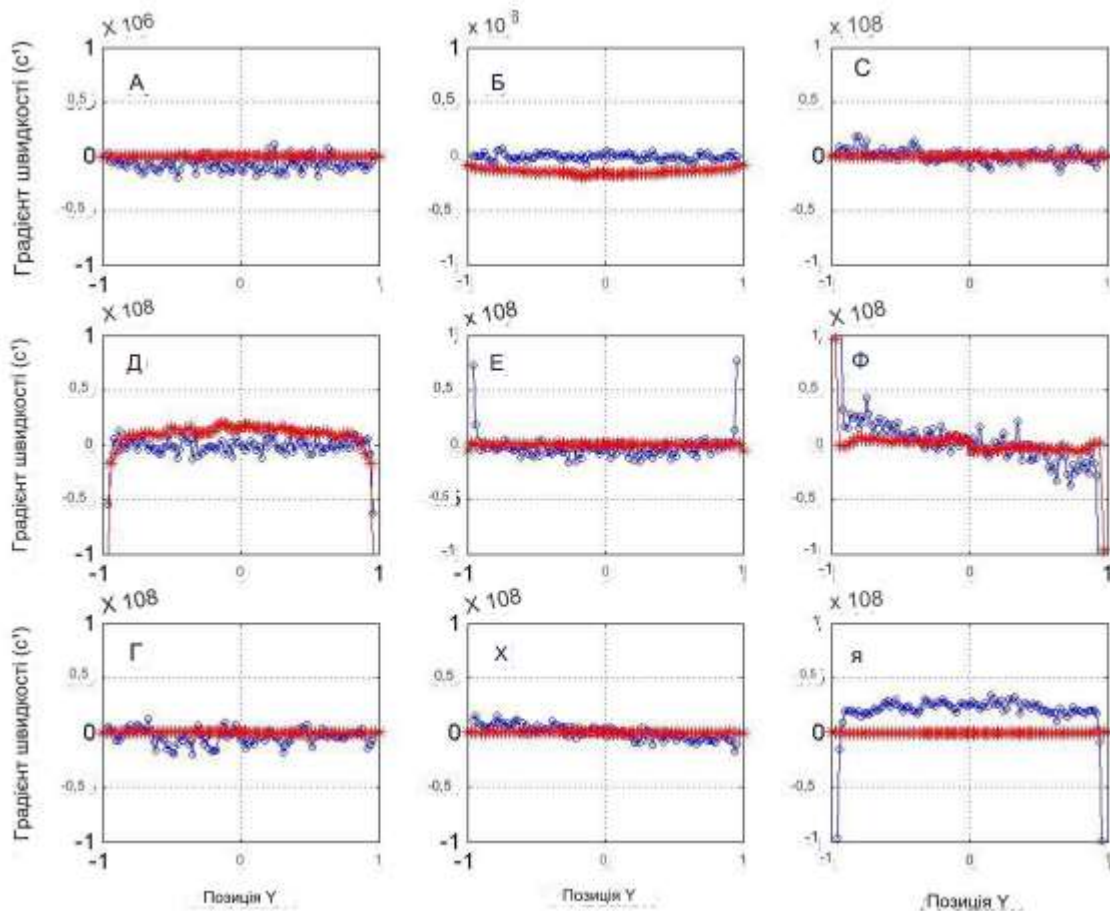


Рис. 4.9. Результати моделювання компонентів градієнта швидкості (с-1) на основній осі вихідного отвору плоского вентилятора XR8001VS (—) і

порожнистих конусних (—*—) форсунок ТХА8001VK при об'ємній швидкості потоку 34,7 см³/с

Для насадки XR8001VS різні компоненти градієнта швидкості сприяють швидкості розсіювання енергії [28]. Важливий внесок робить осьовий потік компонент, який відображає зсувний потік і компонент розширення потоку. З іншого боку, для насадки ТХА8001VK тангенціальна і осьова компоненти потоку сприяють швидкості розсіювання енергії, і вони вказують на ротаційний характер потоку.

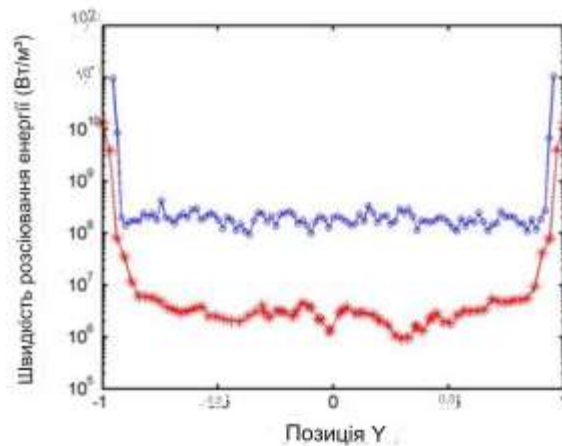


Рис. 4.10. Швидкість розсіювання енергії (Вт/м³), обчислена на головній осі вихідного отвору плоского вентилятора XR8001VS (—о—) і порожнистих конусних (—*—) форсунок ТХА8001VK при об'ємній швидкості потоку 34,7 см³/с. Y-положення було нормалізовано за допомогою діаметр вихідного отвору ТХА8001VK.

Зменшена площа потоку вузького еліптичного отвору форсунки XR8001VS змушує рідину прискорюватися локально, що призводить до великих градієнтів швидкості та високих рівнів розсіювання енергії в межах цього отвору. Це

відбувається внаслідок характеру розширення потоку у вузькому еліптичному отворі сопла.

Результати показують, що насадка XR8001VS спричинює значні пошкодження для всіх видів нематод, і це пояснюється великими рівнями розсіювання енергії всередині вузького еліптичного отвору [28,29]. З іншого боку, насадка ТХА8001VK викликає мінімальні пошкодження нематодам, це може бути пов'язане з характером потоку і розширенням потоку на круглому вихідному отворі сопла.

Загально кажучи, результати дослідження підтверджують гіпотезу, що розтягуючі напруги, що розвиваються всередині поля розширення потоку, можуть завдати шкоди біологічним матеріалам, таким як нематоди.

Обрані форсунки XR8001VS і FL5-VS, як найменші комерційно доступні насадки свого типу, щоб вивчити найгірші можливі гідродинамічні умови. Насадка ТХА8001VK була обрана через подібну потужність до XR8001VS, але менший розмір, і її комерційну доступність [28,29]. Виробник рекомендує робочий тиск для цих насадок в діапазоні 15-60 мм для XR8001VS, 40-125 мм для ТХА8001VK і 15-40 мм для FL5-VS.

Використання об'ємної швидкості потоку (0,28, 0,37, 0,46 л/хв) значно вищі, ніж рекомендації для XR8001VS і ТХА8001VK, і в межах діапазону для FL5-VS. Помірна втрата життєздатності ентомопатогенних нематод була виявлена при використанні цих насадок з робочим тиском 21.5 см³/с. Отже, всі три насадки підходять для нанесення ентомопатогенних нематод за умови дотримання рекомендацій виробника [28,29].

Аналіз більш великих насадок плоского вентилятора, такі як XR8002VS і XR8004VS, і виявили відсутність істотного зниження життєздатності ентомопатогенних нематод. Більш потужні насадки можуть бути більш

корисними для ентомопатогенних нематод, особливо для ґрунтових обробок, де потрібно багато води для забезпечення вологою за межами поверхні ґрунту.

Також важливо враховувати розмір конічних насадок відносно довжини ентомопатогенних нематод. Для довгих видів нематод, слід використовувати насадки більшої потужності.

Виробник рекомендує використовувати звичайні насадки розпилювачі з отворами більше 50 мікрометрів та робочим тиском менше 2000 кПа. Однак, до цього дослідження не було наукових даних, що підтверджували б ці рекомендації [28-33]. Отже, результати цього дослідження надають науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору насадок і встановлення оптимальних умов для безпечної доставки біопестицидів.

Загалом, результати дослідження показують, які характеристики насадок є менш шкідливими для біологічних агентів, і рекомендують використовувати конічні насадки для нанесення спрею з метою уникнення гідродинамічного пошкодження цих агентів. Додаткові дослідження можуть надати більше інформації про міцність різних біологічних агентів і встановити конкретні рекомендації для їх використання.

Висновки з Розділу 4

Ми провели дослідження, в якому чисельно моделювали поля потоку двох сільськогосподарських гідравлічних насадок: плоского вентилятора XR8001VS та порожнього конуса ТХА8001VK. Наші дослідження показали, що існують значні різниці в середніх швидкостях розсіювання енергії всередині цих насадок при різних умовах експерименту.

Зокрема, ми виявили, що насадка XR8001VS мала вищу енергію коефіцієнта дисипації в порівнянні з насадкою ТХА8001VK для різних експериментальних умов. Ця вища енергія викликала значний знижений відсоток життєздатності ентомопатогенних нематод.

Наш аналіз також показав, що вузький вихідний отвір еліптичної форми плоского вентилятора створює режим розширеного потоку, де розтягуючі напруги є достатньо сильними, щоб пошкодити нематоди. Навпаки, конічна насадка не створювала гідродинамічних умов, що сприяли б значному пошкодженню ентомопатогенних нематод. За винятком одного виду, розмір якого відповідав розмірам отвору конуса, і можливо спричинив пошкодження.

Наші експериментальні дані також показали, що швидкості потоку в нашому дослідженні були значно вищими, ніж рекомендовані виробником для насадок XR8001VS і ТХА8001VK. Отже, ці насадки можуть бути використані для розпилення ентомопатогенних нематод, дотримуючись вимог виробника. Однак для більш довгих видів ентомопатогенних нематод рекомендується використовувати насадки більшої потужності.

Загалом, на основі характеристик поля потоку та обчислених швидкостей розсіювання енергії ми рекомендуємо використовувати конічні насадки для розпилення ентомопатогенних нематод, щоб уникнути гідродинамічного пошкодження біологічних агентів.

ВИСНОВКИ

Результати цієї роботи показують, що можливе механізоване застосування біопестицидів за допомогою звичайної системи рідкого внесення, однак існують обмеження щодо обладнання та умов експлуатації.

Важливо враховувати вимоги кожного біологічного агента з огляду на умови (тобто тиск, гідродинамічну напругу, температура), з якими вони можуть зіткнутися під час потоку через систему розпилення. Найбільш значущі висновки з експериментального аналізу та комп'ютерного моделювання підсумовуються наступним чином:

1. Види нематод є важливим фактором, який слід враховувати при визначенні робочих умов розпилення. Робочий тиск в системі розпилення не повинен перевищувати 2000 кПа.

2. Фундаментальне дослідження, яке поєднало експериментальний аналіз пошкодження нематод з чисельним моделюванням поля потоку з високою роздільною здатністю (різке скорочення) надав розуміння механізму гідродинамічної напруги, яка спричинила пошкодження. Було виявлено, що напруга розтягування, яка характеризує режим потоку розтягування, пошкоджує біологічний матеріал.

3. Звичайні гідравлічні форсунки (плоскі віялові та конічні) придатні для нанесення нематод розпиленням за умови дотримання рекомендацій виробника. Однак, виходячи з характеристики поля потоку, насадка конічного типу відповідного розміру створює гідродинамічні умови, які є менш шкідливими для біологічних агентів у порівнянні з насадкою з плоским вентилятором.

4. Було встановлено, що обчислювальна гідродинаміка є можливим методом оцінки умов потоку всередині компонента обладнання, щоб передбачити, чи підходить обладнання для біологічного агента. Швидкість розсіювання енергії, з чисельного моделювання, є значущим параметром поля

поток для характеристики гідродинамічних умов, відповідальних за пошкодження біологічного матеріалу.

5. Інтенсивна рециркуляція резервуарної суміші може призвести до значного підвищення температури рідини. Для боротьби з нематодами краще підходять мембранні і роликові насоси порівняно з відцентровим насосом, який вносить значну кількість тепла в насосну систему.

Ентомопатогенні нематоди є досить стійкими до гідродинамічних умов, з якими вони можуть стикатися під час розпилення. У порівнянні з іншими біологічними агентами, такими як гриби або макроскопічні організми, нематоди менш схильні до пошкоджень і можуть бути доставлені стандартним обладнанням для розпилення. Перш ніж розробляти нове обладнання, важливо дослідити вимоги до інших біологічних агентів щодо їх міцності та стійкості до розпилення. Це надасть рекомендації для вибору правильного обладнання та робочих умов для безпечної доставки різних біопестицидів.

Дослідження структурних властивостей різних видів нематод може допомогти зрозуміти, як організми реагують на гідродинамічне навантаження. Ця інформація буде корисною як для технологій розпилення, так і для стратегій виробництва біопестицидів в масштабах.

Дослідження також виявило, що під час рециркуляції насоса температура в резервуарі підвищується, що може впливати на життєздатність та інфекційність біопестицидів. Температура може бути критичним фактором для успішної доставки біопестицидів, і додаткові дослідження щодо впливу температури та часу важливі для встановлення оптимальних умов для збереження біопестицидів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Засоби захисту рослин: види, характеристика, застосування: веб-сайт. URL: <https://oceaninvest.ua/blog/news/plant-protection-products-types-characteristics> (дата звернення 14.07.23).
2. Біологічний метод захисту рослин– ефективно та безпечно: веб-сайт. URL: <https://senchanska-gromada.gov.ua/news/1626088639/> (дата звернення 14.07.23).
3. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН: веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення 14.07.23).
4. Світовий досвід застосування біологічного методу захисту рослин та перспективи в Україні: веб-сайт. URL: <https://svgr.gov.ua/news/1666084314/> (дата звернення 14.07.23).
5. Baby Bio 86600241 Houseplant Bug Killer, 1L - Fast Acting Control of Houseplant Insect Pests - with 2 Weeks Protection Against Fruit Fly, Whitefly, Greenfly and More - Insect Repellant Spray: веб-сайт. URL: <https://www.amazon.co.uk/Baby-Bio-Houseplant-Bug-Killer/dp/B07MQ63CV4> (дата звернення 14.07.23).
6. Писаренко В. М., Коваленко Н. П., Поспелова Г. Д., Піщаленко, М. А., Нечипоренко Н. І., Шерстюк О. Л. Сучасна стратегія інтегрованого захисту рослин. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2020. № 4. С. 104 – 111.
7. Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О. Технічний сервіс в АПК: навч. посіб. Т. 1. Вінниця: ВНАУ. 2019. 648 с.
8. Супрун Д.Г., Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б. Ремонт машин та обладнання: навч. посіб. Вінниця: ВНАУ. 2012. 85 с.
9. Кухтов В.Г., Іванова Ю.В., Лебедева І., Створення інформаційної бази для контролю якості запасних частин сільськогосподарської техніки. *«Техніка і технології АПК»*. 2012 №4 (31). С.37-39.

10. Головчук А.Ф., Орлов В.Ф., О.П. Експлуатація та ремонт сільськогосподарської техніки: підручник у 3кн. Кн.1 Трактори / За ред. А.Ф. Головчука. Київ: Грамота, 2003. 336 с.
11. Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О. Технічний сервіс в АПК: навч. посіб. Т. 1. Вінниця: ВНАУ. 2019. 648 с.
12. Шаргородський С.А., Руткевич В.С., Ящук Є.В. Математичне моделювання гідропривода переведення широкозахватного сільськогосподарського агрегату із транспортного положення у робоче. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 3 (106). С. 54-63.
13. Супрун Д.Г., Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б. Ремонт машин та обладнання: навч. посіб. Вінниця: ВНАУ. 2012. 85 с.
14. Веселовська Н. Р., Руткевич В. С., Шаргородський С. А. Технологічні основи сільськогосподарського машинобудування. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 283 с.
15. Веселовська Н.Р., Іванов М.І., Руткевич В.С., Шаргородський С.А. Гідравліка: Навчальний посібник. Вінниця: 2019. 222 с
16. Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Підвищення ефективності технологій та технічних засобів контролю якості відновлення двигунів малогабаритної техніки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 137-151.
17. Білоконь Я.Ю., Окоча А.І., Войцехівський С.О. Трактори та автомобілі: підручник. Київ: Вища освіта, 2003. 560 с.
18. Новітні агротехнології у рослинництві: Підручник / В.Д.Паламарчук, І.С. Поліщук, В.А. Мазур, О.Д. Паламарчук. Вінниця, 2017. 602 с
19. Кухтов В.Г., Іванова Ю.В., Лебедева І., Створення інформаційної бази для контролю якості запасних частин сільськогосподарської техніки. *«Техніка і технології АПК»*. 2012 №4 (31). С.37-39.

20. Г.М. Калетнік, М.Г. Чаусов, В.М. Швайко, В.М. Пришляк, А.П. Пилипенко, М.М. Бондар. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Ч I, II : Підручник. К.: Хай-Тек-Прес, 2011. 616 с.
21. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Іванишин В.В. Про розробку і створення в Україні сільськогосподарських машин сучасного рівня. *Зб. наук. праць Вінницького націон. аграрн. ун-ту. Серія: Технічні науки.* 2012. Вип. 11. Т. 2 (66). С. 8–14.
22. Анісімов, В. Ф., Гунько, І. В., Борисюк, Д. В., Зіменко, Д. В. Методи безрозбірного діагностування двигунів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2015. № 3. С. 42-46.
23. Шкрегаль, О. М., Лимаренко В.М., Рильський Д.О. Застосування сучасних діагностичних методів та засобів підвищення технічного рівня машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* 2014. № 145. С. 174-178.
24. Солоня О.В. Теорія механізмів і машин: метод. вказівки і завдання на курсовий проект для студ. ф-ту механізації сільського госп. / О.В. Солоня; М-во АПУ, ВДАУ. Вінниця: ВДАУ, 2008. - 46 с.
25. Лисогор В.М. Методологія та організація наукових досліджень в агропромисловому комплексі: [монографія] / В.М. Лисогор, М.П. Єленіч,
26. Ю.Б. Паладійчук ; ред. Г.М. Калетнік ; М-во аграр. політики та прод. України, ВНАУ. Вінниця: Меркьюрі - Поділля, 2013. 279 с.
27. Матвійчук В.А. Методологія та організація наукових досліджень : метод. вказівки для проведення практ. з навч. дисципліни для студ. 5 курсу заочної форми навч. ОКР "магістр" за спец. 8.1001010 "Енергетика с.-г. вирва" / В. А. Матвійчук, В. В. Явдик ; М-во освіти і науки України, ВНАУ, Ф-т механізації с.-Г., Каф. електротехн. систем, технологій та автоматизації в АПК. - Вінниця: РВВ ВДАУ, Діло, Данилюк В.Г., 2016. 83 с.

28. Цуркан О.В., Полевода Ю.А., Ковальчук О.С. Методичні вказівки для самостійної роботи студентів із дисципліни "Основи наукових досліджень" для студентів напряму підготовки 6.050503 "Обладнання переробних і харчових виробництв" денної та заочної форми навчання. Вінниця: ВНАУ, 2017.

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

30. Дубчак В.М., Новицька Л.І., Теорія ймовірностей та математична статистика: методичні вказівки для самостійної підготовки здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня освіти галузі знань галузі знань 12 – «Інформаційні технології», спеціальності 122 – «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» денної та заочної форми навчання. Дубчак В.М., Новицька Л.І.; Вінн. нац. аграр. ун-т. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 134 с.

31. Теоретична механіка. навч. посіб. В. М. Булгаков, Г. М. Калетнік, І. Є. Кравченко [та ін.] / за ред. В. М. Булгакова, С. І. Кучеренка. - К. : Хай-ТекПрес, 2011. 608 с.

32. Теоретична механіка. навч. посіб. В. М. Булгаков, Г. М. Калетнік, І. Є. Кравченко [та ін.]; за ред. В. М. Булгакова, С. І. Кучеренка. - К.: Хай-ТекПрес, 2011. 340 с.

33. Яропуд В.М., Гунько І.В., Середа Л.П., Швець Л.В., Труханська О.О. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 20 «Аграрні науки та продовольство» спеціальності 208 «Агроінженерія» денної та заочної форм навчання. Вінниця: ВНАУ, 2023. 39 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Визначення рівнянь неперервності та імпульсу

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{A.2})$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (\text{A.3})$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = \rho g_r + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (\text{A.6})$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = \rho g_\theta + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \quad (\text{A.7})$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho g_z + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (\text{A.8})$$

ДОДАТОК Б

Дані дослідження перепаду тиску

види EPN	Тиск (кПа)	Повинен	Субвибірка	Життя	Мертвий цілий	Половина шматка	Чверть шматка
H. bacteriophora	Початковий	1	1	145	0	0	0
			2	121	0	0	0
			3	110	0	0	0
		2	1	213	4	0	0
			2	149	3	0	0
			3	190	5	0	0
	0	1	1	145	4	0	0
			2	163	12	0	1
			3	156	3	0	2
		2	1	245	6	0	0
			2	250	4	1	0
			3	215	5	0	0
	1283	1	1	100	1	0	0
			2	104	2	0	0
			3	97	3	0	0
		2	1	118	9	1	2
			2	96	6	5	1
			3	155	4	0	1
	1710 рік	1	1	61	1	0	0
			2	80	4	2	0
			3	98	3	2	2
		2	1	191	7	0	1
			2	198	9	1	0
			3	204	15	1	1
2138	1	1	48	0	1	0	
		2	95	2	1	0	
		3	90	3	0	2	
	2	1	152	18	4	2	
		2	180	20	4	1	
		3	133	21	2	1	

ДОДАТОК В

Дані дослідження потоку сопла

види EPN	Тип насадок	Швидкість поршня (см/с)	Потік	Субвибірка	Життя	Мертвий цільий	Повітря	Чверть штук
H. bacteriophora	XR01	13	1	1	91	0	0	0
				2	81	0	0	0
				3	80	0	0	0
			2	1	73	0	0	0
				2	67	2	0	0
				3	69	0	0	0
		17	1	1	49	5	0	0
				2	56	3	0	0
				3	47	9	1	0
				контроль*	76	0	0	0
			2	1	52	6	0	1
				2	56	4	0	0
				3	54	1	0	0
				контроль	74	0	0	0
		21	1	1	96	41	0	0
				2	83	21	1	1
				3	73	29	0	0
				контроль	103	1	0	0
			2	1	43	14	0	0
				2	48	9	0	0
				3	57	8	0	0
				контроль	75	0	0	0
		20	1	1	22	37	0	1
				2	27	30	0	0
3	17			25	0	0		
контроль	76			0	0	0		
2	1		46	12	0	0		
	2		49	16	0	1		

ДОДАТОК Г

Експериментальні умови під час рециркуляції насоса

Тип насоса	Час (хв)	Т рециркуляції (°C)	Т рециркуляції (°C)	Т байпас (°C) повтор 1	Т bypass (°C) rep 2	Т насоса (°C) 1	Т насоса (°C) 2
Відцентровий	0	21,99	22,54	23,62	23,79	23,66	23,9
	1	22,49	22,89	23,59	24,15	23,82	24,29
	2	22,85	23,26	24,08	24,54	24,28	24,67
	3	23,22	23,63	24,49	24,9	24,71	25,04
	4	23,6	23,99	24,89	25,26	25,11	25,41
	5	23,98	24,35	25,29	25,61	25,52	25,75
	6	24,37	24,72	25,66	25,93	25,89	26,08
	7	24,73	25,08	26,03	26,32	26,24	26,46
	8	25,1	25,47	26,33	26,68	26,56	26,84
	9	25,49	25,81	26,7	27,04	26,94	27,2
	10	25,86	26,2	27,08	27,4	27,31	27,56
	11	26,24	26,57	27,45	27,76	27,68	27,94
	12	26,61	26,92	27,82	28,12	28,05	28,3
	13	26,97	27,29	28,19	28,48	28,41	28,65
	14	27,34	27,65	28,58	28,82	28,81	29
	15	27,71	28	28,95	29,18	29,17	29,36
	16	28,08	28,36	29,3	29,53	29,53	29,69
	17	28,44	28,75	29,67	29,89	29,88	30,05
	18	28,79	29,07	30,03	30,23	30,25	30,4
	19	29,18	29,42	30,4	30,57	30,61	30,75
	20	29,53	29,79	30,76	30,92	30,96	31,09
	21	29,9	30,13	31,12	31,3	31,33	31,48
	22	30,26	30,47	31,48	31,67	31,7	31,84
	23	30,61	30,81	31,84	32,02	32,06	32,19
	24	30,96	31,16	32,2	32,36	32,41	32,53
	25	31,32	31,51	32,54	32,69	32,75	32,87
	26	31,67	31,86	32,88	33,03	33,08	33,2
	27	32,03	32,19	33,23	33,38	33,43	33,54
28	32,38	32,53	33,59	33,71	33,78	33,88	

Centrifugal	29	32.73	32.85	33.94	34.05	34.13	34.2
	30	33.08	33.2	34.28	34.39	34.47	34.55
	31	33.44	33.54	34.64	34.71	34.81	34.86
	32	33.77	33.86	34.98	35.03	35.16	35.19
	33	34.11	34.19	35.34	35.37	35.52	35.52
	34	34.48	34.52	35.69	35.69	35.86	35.84
	35	34.81	34.85	36.03	36.03	36.2	36.17
	36	35.15	35.19	36.37	36.35	36.54	36.5
	37	35.5	35.5	36.72	36.69	36.88	36.84
	38	35.82	35.82	37.04	37	37.2	37.16
	39	36.16	36.16	37.35	37.33	37.5	37.47
	40	36.49	36.45	37.67	37.6	37.83	37.78
	41	36.82	36.81	38	37.95	38.15	38.1
	42	37.16	37.12	38.32	38.27	38.48	38.41
	43	37.48	37.41	38.67	38.6	38.82	38.72
	44	37.81	37.7	38.98	38.87	39.13	39.03
	45	38.13	38.05	39.3	39.2	39.45	39.35
	46	38.45	38.36	39.62	39.5	39.77	39.65
	47	38.77	38.66	39.94	39.8	40.1	39.95
	48	39.09	38.97	40.26	40.11	40.41	40.26
	49	39.41	39.27	40.57	40.4	40.73	40.55
	50	39.72	39.58	40.88	40.71	41.04	40.86
	51	40.04	39.87	41.19	41.01	41.36	41.17
	52	40.35	40.18	41.51	41.3	41.68	41.47
	53	40.64	40.48	41.81	41.61	41.98	41.79
	54	40.95	40.75	42.1	41.9	42.26	42.08
	55	41.25	41.06	42.37	42.19	42.54	42.37
	56	41.55	41.35	42.69	42.49	42.88	42.67
	57	41.86	41.63	43	42.78	43.19	42.96
	58	42.15	41.92	43.26	43.04	43.42	43.25
	59	42.46	42.19	43.41	43.34	43.61	43.54
	60	42.75	42.46	43.75	43.6	43.96	43.82
	61	43.04	42.78	44.07	43.9	44.28	44.1
	62	43.34	43.04	44.36	44.12	44.58	44.34
	63	43.61	43.31	44.65	44.34	44.88	44.57
	64	43.92	43.6	44.93	44.61	45.17	44.84
	65	44.19	43.87	45.21	44.88	45.47	45.12
	66	44.54	44.16	45.52	45.18	45.76	45.39
	67	44.76	44.45	45.78	45.44	46.05	45.67
	68	45.05	44.67	46.05	45.66	46.34	45.94
	69	45.33	44.94	46.36	45.93	46.64	46.21
	70	45.58	45.21	46.63	46.17	46.94	46.47
	71	45.86	45.48	46.9	46.39	47.22	46.69
	72	46.11	45.72	47.15	46.63	47.49	46.94
	73	46.41	45.97	47.42	46.86	47.78	47.19
	74	46.67	46.22	47.69	47.1	48.07	47.44

Centrifugal	75	46.94	46.47	47.97	47.34	48.37	47.7
	76	47.22	46.7	48.23	47.57	48.66	47.95
	77	47.49	46.95	48.49	47.83	48.93	48.2
	78	47.73	47.2	48.74	48.05	49.2	48.44
	79	47.95	47.42	48.97	48.26	49.44	48.7
	80	48.14	47.65	49.09	48.5	49.55	48.95
	81	48.43	47.92	49.33	48.77	49.84	49.2
	82	48.67	48.13	49.57	48.97	50.1	49.44
	83	48.9	48.38	49.81	49.21	50.35	49.69
	84	49.14	48.59	50.03	49.43	50.6	49.92
	85	49.37	48.82	50.28	49.65	50.86	50.17
	86	49.59	49.02	50.48	49.86	51.09	50.41
	87	49.84	49.22	50.71	50.06	51.36	50.64
	88	50.08	49.46	50.96	50.29	51.63	50.87
	89	50.3	49.71	51.18	50.45	51.88	51.11
	90	50.53	49.92	51.41	50.72	52.11	51.34
	91	50.75	50.13	51.62	50.95	52.36	51.58
	92	50.96	50.34	51.84	51.16	52.61	51.81
	93	51.17	50.52	52.04	51.3	52.84	52.02
	94	51.4	50.71	52.26	51.51	53.08	52.24
95	51.6	50.92	52.44	51.71	53.3	52.46	
96	51.82	51.13	52.66	51.91	53.54	52.68	
97	52.02	51.32	52.85	52.09	53.77	52.9	
98	52.23	51.51	53.06	52.29	54.01	53.12	
99	52.44	51.71	53.27	52.48	54.25	53.35	
100	52.66	51.91	53.45	52.69	54.46	53.59	
101	52.86	52.09	53.66	52.89	54.69	53.81	
102	53.06	52.3	53.83	53.09	54.9	54.02	
103	53.26	52.47	54.02	53.26	55.11	54.24	
104	53.46	52.66	54.2	53.42	55.35	54.44	
105	53.64	52.83	54.38	53.59	55.56	54.64	
106	53.83	53.02	54.58	53.79	55.78	54.85	
107	54.01	53.21	54.77	53.96	56.01	55.07	
108	54.2	53.38	54.92	54.14	56.18	55.27	
109	54.38	53.55	55.09	54.32	56.38	55.48	
110	54.54	53.74	55.23	54.49	56.55	55.69	
111	54.75	53.9	55.41	54.67	56.77	55.89	
112	54.92	54.05	55.58	54.82	56.99	56.09	
113	55.09	54.25	55.78	54.99	57.22	56.29	
114	55.24	54.42	55.95	55.16	57.43	56.48	
115	55.43	54.59	56.12	55.31	57.64	56.68	
116	55.59	54.75	56.29	55.49	57.84	56.87	
117	55.76	54.91	56.46	55.65	58.06	57.06	
118	55.95	55.07	56.66	55.79	58.31	57.26	
119	56.16	55.21	56.86	55.94	58.57	57.45	
120	56.28	55.37	56.99	56.11	58.71	57.63	