

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «першого (бакалаврського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

МОБІЛЬНИЙ ПОДРІБНЮВАЧ РОСЛИННИХ РЕШТОК З ФУНКЦІЄЮ ІНОКУЛЯЦІЇ ТРИХОДЕРМОЮ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н.
_____ Іван КАРАНІКОЛОВ

Виконав здобувач першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти заочної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Вадим ОБУХОВСЬКИЙ

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____ Вадим ОБУХОВСЬКИЙ

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ Вадим ОБУХОВСЬКИЙ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Мобільний подрібнювач рослинних решток з функцією інокуляції триходермою»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 117 від « 05 » _____ 09 _____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 15 червня 2026 року.

3. **Об'єкт дослідження:** технологічний процес механічного подрібнення рослинних решток (соломи зернових, стебел кукурудзи та соняшнику) та їх одночасного оброблення біологічним деструктором на основі гриба роду *Trichoderma*.

4. **Предмет дослідження:** закономірності взаємодії ріжучих органів ротора зі стеблами рослин; гідродинамічні характеристики напірного розпилення спорової суспензії під захисним кожухом робочого органу; закономірності інформаційно-енергетичного узгодження параметрів механічних (привід ротора) та гідравлічних (система дозування) систем агрегату.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: виконати аналіз агротехнічного та екологічного значення використання соломи як органічного добрива, визначити основні проблеми її розкладу; розробити математичні моделі: кінематики різання Y-подібними ножами, гідродинаміки розпилення суспензії, інформаційно-енергетичної взаємодії систем та динаміки рідинного контуру.

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: виконати інженерні розрахунки конструктивних та енергетичних параметрів ножового ротора (діаметр, кількість ножів, кутова швидкість, потужність приводу); розрахувати параметри гідравлічної системи подачі біопрепарату (ємність бака, продуктивність насоса, кількість і тип форсунок); розробити структурну схему системи автоматичного пропорційного дозування інокуляту; виконати тривимірне моделювання модернізованого подрібнювача-інокулятора та розробити креслення складальних одиниць.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ: розрахувати прямі капітальні витрати на виготовлення або переобладнання подрібнювача.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу: схема гідродинамічних параметрів розпилення (залежність діаметра крапель від тиску).

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу: розрахункова схема роторного вузла з Y-подібними ножами; гідравлічна принципова схема системи інокуляції; структурна схема системи автоматичного пропорційного дозування (з ПД-регулятором).

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

Кошторис капітальних витрат (базовий подрібнювач + система інокуляції)

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

тип рослинних решток: солома зернових, стебла кукурудзи та соняшнику; щільність решток на полі: 0,5–2,5 кг/м²; робоча ширина захвату подрібнювача: 4,5 м; робоча швидкість руху агрегату: 8–15 км/год; бажана довжина фрагментів подрібнення: 0,05–0,12 м.

9. Дата видачі завдання: « 27 » _____ 09 _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Лютий 2026	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту кваліфікаційної роботи	Лютий 2026	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	
4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	

5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	
7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

_____ Вадим ОБУХОВСЬКИЙ

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: 87 сторінок, 20 рисунків, 18 таблиць, 23 джерела за переліком посилань.

Об'єкт дослідження: технологічний процес механічного подрібнення рослинних решток (соломи зернових, стебел кукурудзи та соняшнику) та їх одночасного оброблення біологічним деструктором

Мета роботи: підвищення якості біологічної деструкції пожнивних решток шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів мобільного роторного подрібнювача та розробки системи автоматичного супутнього дозування суспензії триходерми в єдиному технологічному циклі.

Методи дослідження: аналітичний огляд літературних джерел та патентної інформації; методи математичного моделювання (кінематичний, динамічний та гідродинамічний аналіз); інженерні розрахунки з використанням довідкових даних та нормативної документації; методи комп'ютерного тривимірного моделювання (CAD-системи); техніко-економічний аналіз.

Основні результати: Розроблено структурну схему системи автоматичного пропорційного дозування з ПД-регулятором, яка забезпечує підтримання заданої норми внесення інокуляту з точністю $\pm 5\%$ незалежно від коливань швидкості руху агрегату. Створено тривимірну модель подрібнювача-інокулятора та комплект складальних креслень основних вузлів для виготовлення дослідного зразка.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПОДРІБНЮВАЧ РОСЛИННИХ РЕШТОК, ІНОКУЛЯЦІЯ, TRICHODERMA, РОТОРНИЙ МУЛЬЧЕР, БІОЛОГІЧНА ДЕКТРУКЦІЯ, СОЛОМА, ГІДРАВЛІЧНА СИСТЕМА, АВТОМАТИЧНЕ ДОЗУВАННЯ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Обуховський							
Перевір.	Дядюра К. О.						5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ТА БІОЛОГІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ РОСЛИННИХ РЕШТОК	11
1.1 Агротехнічне та екологічне значення використання соломи як органічного добрива в сучасному землеробстві	11
1.2 Біологічні особливості деградації стерні грибами роду <i>Trichoderma</i> та вимоги до їх закладання в ґрунт	15
1.3 Огляд існуючих конструкцій подрібнювачів рослинних решток та обприскувальних систем для внесення біопрепаратів	19
Висновки.....	24
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ТА ІНОКУЛЯЦІЇ	26
2.1 Кінематика різання та динаміка взаємодії Y-подібних ножів ротора із соломистим матеріалом	26
2.2 Математичне моделювання гідродинамічних параметрів напірного розпилення спорової суспензії в зоні кришення.....	32
2.3 Інформаційно-енергетична взаємодія технічних систем: узгодження швидкості руху МТА	36
2.4 Динаміка рідинного контуру: запобігання розстроюванню дисперсності факела розпилу при коливаннях тиску та забиванні сопел	40
Висновки.....	

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ										45							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата																		
Розроб.		Обуховський			ЗМІСТ										Літ.	Аркуш		Аркушів				
Перевір.		Дядюра К. О.																6		2		
Реценз.																						
Н. Контр.																						
Затверд.		Дядюра К. О.																				

РОЗДІЛ 3 ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУКТИВНЕ ПРОЄКТУВАННЯ.....	47
3.1 Розрахунок конструктивних та енергетичних параметрів ножового ротора	47
3.2 Розрахунок гідравлічної системи подачі біопрепарату	51
3.3 Розробка структурної схеми системи автоматичного пропорційного дозування інокуляту від швидкості руху МТА	54
3.4 Тривимірне моделювання модернізованого подрібнювача-інокулятора та креслення складальних одиниць	58
Висновки.....	61
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	62
4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при роботі з роторними мульчерами.....	62
4.2 Особливості безпеки праці та санітарно-гігієнічні вимоги при роботі з біологічними препаратами <i>Trichoderma</i>	66
4.3 Екологічний аналіз прискореної гуміфікації пожнивних решток та зниження інфекційного фону ґрунту	68
Висновки.....	71
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ	72
5.1 Розрахунок прямих капітальних витрат на виготовлення або переобладнання подрібнювача	72
5.2 Визначення операційної економії за рахунок прискорення деструкції соломи та відмови від додаткового внесення азотних добрив	74
5.3 Оцінка показників економічної ефективності та терміну окупності модернізованого агрегату.....	77
Висновки.....	82
ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85

ВСТУП

Актуальність теми. Проте традиційне внесення рідких біопрепаратів класичними польовими обприскувачами має вкрай низьку ефективність. Спори *Trichoderma* є надзвичайно чутливими до ультрафіолетового випромінювання — під дією прямого сонячного світла вони втрачають життєздатність за лічені хвилини. Окрім того, поверхнєве нанесення на суху неподрібнену соломку не забезпечує контакту міцелію з внутрішніми тканинами трубчастих стебел, де зосереджена основна маса лігноцелюлозних сполук.

Вирішення цієї проблеми полягає в інтеграції процесів механічного подрібнення та миттєвого вологого оброблення біопрепаратом в одному робочому органі. Реалізація цієї концепції вимагає розробки мобільного роторного подрібнювача з інтегрованою системою інокуляції — агрегату, який одночасно подрібнює рослинні рештки та наносить на них суспензію спор *Trichoderma* безпосередньо в зоні кришення, під захисним кожухом, що унеможливорює вплив ультрафіолету та забезпечує максимальний контакт біопрепарату зі свіжим зрізом стебел. Стабільна робота такого комбінованого знаряддя можлива лише за умови бездоганної взаємодії технічних систем: механічного приводу ріжучого ротора, напірної гідравлічної системи та електронного блоку пропорційного дозування робочої рідини залежно від швидкості руху агрегату. Отже, розробка мобільного подрібнювача рослинних решток із функцією інокуляції триходермою є актуальним науково-прикладним завданням, що має важливе агротехнічне, екологічне та економічне значення для сільськогосподарського виробництва України.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Обуховський			ВСТУП			Літ.		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К. О.								8	3
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Мета дослідження підвищення якості біологічної деструкції пожнивних решток шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів мобільного роторного подрібнювача та розробки системи автоматичного супутнього дозування суспензії триходерми в єдиному технологічному циклі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан технологій та технічних засобів для подрібнення та біологічної деструкції рослинних решток, виявити їхні переваги та недоліки.

2. Дослідити біологічні особливості деструкції стерні грибами роду *Trichoderma* та обґрунтувати вимоги до їх закладання в ґрунт.

3. Розробити математичні моделі кінематики різання Y-подібних ножів ротора, гідродинаміки напірного розпилення спорової суспензії та інформаційно-енергетичної взаємодії технічних систем агрегату.

4. Виконати інженерні розрахунки конструктивних та енергетичних параметрів ножового ротора, гідравлічної системи подачі біопрепарату та системи автоматичного пропорційного дозування.

5. Розробити структурну схему та тривимірну модель модернізованого подрібнювача-інокулятора, виконати креслення складальних одиниць.

6. Провести аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при роботі з роторними мульчерами та біологічними препаратами, обґрунтувати заходи безпеки.

7. Здійснити техніко-економічне обґрунтування інноваційного проєкту, розрахувати капітальні витрати, операційну економію та термін окупності модернізованого агрегату.

Об'єкт дослідження – технологічний процес механічного подрібнення рослинних решток та їх одночасного оброблення біологічним деструктором на основі гриба *Trichoderma*.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії ріжучих органів ротора зі стеблами рослин, гідродинамічні характеристики розпилення спорової суспензії під кожухом робочого органу, а також закономірності інформаційно-

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергетичного узгодження параметрів механічних та гідравлічних систем агрегату.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс методів наукового пізнання: аналітичний огляд літературних джерел та патентної інформації; методи математичного моделювання (кінематичний, динамічний та гідродинамічний аналіз); інженерні розрахунки з використанням довідкових даних та нормативної документації; методи комп'ютерного тривимірного моделювання (CAD-системи); техніко-економічний аналіз.

Наукова новизна Наукова новизна одержаних результатів:

— уперше обґрунтовано конструктивно-технологічну схему мобільного подрібнювача з інтегрованою системою інокуляції, яка забезпечує одночасне механічне подрібнення рослинних решток та нанесення суспензії *Trichoderma* безпосередньо в зоні кришення під захисним кожухом;

— розроблено математичну модель інформаційно-енергетичної взаємодії технічних систем, що описує узгодження швидкості руху МТА, завантаження ротора та секундної витрати інокуляту за допомогою електронної системи дозування;

— удосконалено методику розрахунку гідродинамічних параметрів напірного розпилення спорової суспензії з урахуванням динаміки рідинного контуру та запобігання розстроюванню системи при коливаннях тиску;

— набули подальшого розвитку теоретичні положення щодо кінематики різання Y-подібних ножів ротора та динаміки їх взаємодії із соломистим матеріалом.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ТА БІОЛОГІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ РОСЛИННИХ РЕШТОК

1.1 Агротехнічне та екологічне значення використання соломи як органічного добрива в сучасному землеробстві

Сучасний стан родючості ґрунтів України. Проблема деградації ґрунтового покриву в Україні набула загрозливих масштабів [1, 2]. Протягом останніх 40–50 років аграрне виробництво робило основну ставку на мінералізацію ґрунтів, адже мінеральні добрива сприяли швидкому зростанню врожайності культур [3]. Однак сьогодні агрономічна служба змушена боротися з наслідками не надто продуманої стратегії удобрення полів. Щорічні втрати гумусу в ґрунтах України становлять 0,5–0,7 т/га, а в абсолютному вимірі сягають понад 40 млн т на рік. Лише за останні три роки ґрунти України в середньому втратили 0,05 % гумусу, 4 мг рухомих фосфатів та 6 мг обмінного калію у розрахунку на 1 кг ґрунту [2, 4].

Така ситуація зумовлена низкою чинників, серед яких провідне місце посідає тяжіння сучасного українського агробізнесу до монокультури: щороку на одних і тих самих полях вирощують виключно найприбутковіші культури (соняшник, ріпак, зернові), які катастрофічно виснажують ґрунти. Класична система землеробства передбачає відтворення родючості ґрунтів шляхом унесення мінеральних і органічних добрив. Проте мінеральні добрива спричиняють збільшення техногенного навантаження на ґрунт, а органічні — в основному гній — призводять до біологічного забруднення навколишнього середовища [5].

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Обуховський			РОЗДІЛ 1	Літ.	Аркуш
Перевір.		Дядюра К. О.					Аркушів
Реценз.						11	15
Н. Контр.							
Затверд.		Дядюра К. О.					

За зменшення обсягів унесення гною вагомим резервом поліпшення родючості ґрунтів є використання післяжнивних і корневих решток вирощуваних культур [6].

Солома як джерело органічної речовини. Солома є основним джерелом органічних добрив у сучасному землеробстві. Після обмолоту зернових культур на полях залишається в середньому до 2,5 т соломи на гектар посівів. Щороку врожай соломи і стерні зернових культур в Україні становить 45–60 млн т, а разом із рослинними рештками кукурудзи, соняшнику та ріпаку цей показник сягає ще більших обсягів. За вмістом органічної речовини 1 т соломи прирівнюється до 3–4 т підстилкового гною і синтезує 160–180 кг гумусу. За іншими даними, завдяки одній тонні соломи в ґрунті залишається близько 50 кг гумусу. При середній урожайності озимих зернових в Україні 3,7–4,6 т/га отримання 1 т зерна дає близько 400–500 кг соломи, а це майже 1,3–2,1 т соломи з 1 га або 65–100 кг/га гумусу [7].

Солома містить лише 15 % води і на 85 % складається з органічної речовини, у складі якої присутні всі необхідні для рослин макро- та мікроелементи. За рахунок використання соломи та рослинних решток на кожний гектар у ґрунт повертається 15–20 кг азоту, 8–10 кг фосфору і 30–40 кг калію. За іншими узагальненими даними, при середній урожайності пшениці 5–7 т/га в полі залишається приблизно така ж кількість соломи, що містить 2500–3000 кг вуглецю, 70–80 кг калію, 30–35 кг азоту, 10–12 кг фосфору, 40–45 кг кальцію, 5–6 кг магнію та значну кількість мікроелементів [8].

За цим показником солома в 3,5–4 рази перевищує гній, тому реалізувати потребу землеробства в органічних добривах можна не на 25–30 %, а на всі 80–90 % завдяки використанню соломи та інших рослинних решток. У кількісному еквіваленті 1 т соломи може замінити 3–3,5 т гною [9].

Вплив соломи на фізико-хімічні властивості ґрунту. Солома покращує структуру ґрунту, збільшує вміст гумусу завдяки значному ізогумусному коефіцієнту, що коливається від 0,1 до 0,25. Внесення соломи збільшує вміст гумусу, поліпшує структуру ґрунту, зменшує схильність до ерозії, стимулює

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процес азотофіксації і є джерелом живлення для мікроорганізмів у ґрунті. Позитивний ефект використання соломи проявляється в таких аспектах [10]:

- солома здатна замінити гній;
- під час розкладу соломи утворюється гумус;
- покращується водний баланс, ґрунт краще промочується, зменшується випаровування вологи;
- збільшується вміст корисної мікрофлори;
- покращується аерація ґрунту;
- додаткове внесення азоту зводить до нуля негативний вплив органічних кислот (оптимальна норма внесення азоту становить 10 кг азоту на кожную тону соломи);
- при застосуванні деструкторів стерні пришвидшується процес розкладання та зменшується кількість шкідливих патогенів та бактерій.

Систематичне використання поживних решток як органічного добрива посилює життєдіяльність мікрофлори та інтенсивність її дихання, покращує поживний режим та фізико-хімічні властивості ґрунту, підвищує вміст гумусу. Землі, які збагачуються органічним методом, мають сприятливу фізичну структуру, краще утримують воду. Ці поліпшення характеристик ґрунту безпосередньо впливають на врожайність, допомагають підтримувати стабільно високі показники продуктивності посівів навіть у посушливі роки [11].

Повернення поживних решток у ґрунт як органічного добрива сприяє поліпшенню його структури та водоутримуючої здатності. За науковими даними, кожна тону вуглецю допомагає зафіксувати 20–25 кг азоту. При збереженні соломи посилюється загальна біологічна і ферментативна активність ґрунтів, підвищується ефективність ґрунтових мікроорганізмів, які сприяють здоровому стану кореневої системи та стимулюють ріст і розвиток рослин [12].

Завдяки застосуванню різних способів використання соломи після обмолоту зернових культур аграрії можуть самотійно без додаткових витрат відновити до 30–40 % родючості ґрунтів і тим самим забезпечити збільшення врожайності культур наступного року та прибутковості виробництва.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Екологічне значення соломи та проблеми її використання. Солома має вагоме екологічне значення для ґрунтів агроєкосистеми. У сучасних умовах, коли спостерігається прогресуюча деградація ґрунтового покриву та хронічний дефіцит органічних добрив, використання соломи є ефективним засобом підтримання бездефіцитного балансу гумусу й поживних елементів. Водночас спалювання соломи, яке донедавна було поширеною практикою в багатьох господарствах, є неприпустимим з екологічної точки зору. При спалюванні стерні температура на поверхні ґрунту сягає 300 °С. Через це гинуть не лише поживні рештки, а й гумус у шарі до 10 см, азот у кількості близько 20–40 кг/га, вуглець до 3000 кг/га [13, 14] (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Агротехнічне та екологічне значення використання соломи

Незважаючи на значний потенціал соломи як органічного добрива, її використання пов'язане з низкою агротехнічних труднощів [15]:

- процес розкладу достатньо довгий, якщо не застосовувати допоміжних заходів;
- на поживних рештках залишається безліч бактерій та грибкових хвороб;

– присутня невелика фітотоксична дія на наступну рослину в сівозміні (під час розкладання утворюються органічні кислоти), яка проявляється в затримці росту, хлорозі, зменшенні об'єму кореневої системи;

– ускладнюється обробіток ґрунту, якщо солома не подрібнена.

Саме ці проблеми зумовлюють необхідність розробки технологій, що забезпечують прискорену деструкцію соломи та зниження інфекційного фону ґрунту. Оптимальна схема заробки соломи передбачає [16]:

1. Під час збирання попередника комбайном доцільно застосувати подрібнювач, вбудований у комбайни новіших моделей. Якщо ж вбудованого подрібнювача немає, обробку залишків можна провести за допомогою подрібнювача пожнивних решток.

2. Наступний етап — внесення добрив, які слугуватимуть підживленням і прискорять розклад соломи.

1.2 Біологічні особливості деструкції стерні грибами роду *Trichoderma* та вимоги до їх закладання в ґрунт

Систематичне положення та екологічна характеристика. Гриби роду *Trichoderma* належать до відділу Ascomycota, родини Нуросреасеае. Це космополітний рід, представники якого присутні в усіх типах ґрунтів, де вони є одними з найпоширеніших культивованих грибів. *Trichoderma* — це вільноживучі, факультативно аеробні, авірулентні гриби, які часто виступають як симбіонти рослин. Завдяки своїй винятковій конкурентній здатності вони домінують у багатьох ґрунтових мікробних угрупованнях [17] (рисунок 1.2).

Ферментативна активність та механізми деструкції лігноцелюлозних субстратів. Ключова роль *Trichoderma* в розкладі рослинних решток зумовлена здатністю цих грибів синтезувати комплекс потужних гідролітичних ферментів, зокрема целюлаз, геміцелюлаз та лігніндеградуєчих ензимів.

Целюлази — це ферменти, що розщеплюють целюлозу. Мікрокристалічна целюлоза підтримує ріст *Trichoderma harzianum* та індукує продукцію целюлаз у

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рідких культурах. Дослідження показали, що штам *Trichoderma harzianum* UzCF-28 синтезує целюлолітичні ферменти з високою біохімічною активністю [18].



Рисунок 1.2 – Біологічні особливості деградації стерні грибами роду *Trichoderma*

Ці ферменти забезпечують ефективне розщеплення лігніну та целюлози — основних структурних компонентів рослинних клітинних стінок, що зумовлюють стійкість соломи до мікробіологічного розкладу. Завдяки цьому *Trichoderma* значно прискорює процеси мінералізації органічної речовини, сприяючи вивільненню поживних елементів у доступній для рослин формі. Штам *Trichoderma longibrachiatum* TW-14-220T є продуцентом комплексу ферментів ендоглюканаз, бета-глюканаз і ксиланаз. Це дозволяє скоротити період деградації соломи з 3–5 років до одного вегетаційного періоду [19].

Антагоністична активність та біологічний контроль. Окрім деструктивної функції, гриби роду *Trichoderma* виконують важливу роль як агенти біологічного контролю фітопатогенів. *Trichoderma* є одним із найефективніших мікопаразитів, що робить його перспективним агентом біоконтролю проти

широкого спектра ґрунтових патогенів. Механізми антагоністичної дії *Trichoderma* є багатофакторними і включають [20, 21] (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Біологічний потенціал грибів роду *Trichoderma*

Мікопаразитизм — безпосереднє паразитування на гіфах патогенних грибів. *Trichoderma* може паразитувати на інших грибах, що є основою його біоконтролюючої активності. Гіфи *Trichoderma* обвивають гіфи патогена, проникають усередину та розчиняють їх за допомогою гідролітичних ферментів, що призводить до загибелі патогена.

Антибіоз — продукування біологічно активних сполук (антибіотиків, метаболітів), які пригнічують ріст і розвиток патогенних мікроорганізмів. Дослідження підтверджують високий рівень протигрибкової активності нелетких низькомолекулярних екзометаболітів *Trichoderma* spp..

Конкуренція за поживні речовини та простір — завдяки високій швидкості росту та здатності до швидкої колонізації субстратів *Trichoderma* випереджає патогени в освоєнні доступних ресурсів.

Індукція системної стійкості рослин — *Trichoderma* стимулює захисні механізми рослин-господарів, підвищуючи їх стійкість до патогенів. Гриби роду

Trichoderma стимулюють ріст рослин і захищають їх від грибкових та бактеріальних патогенів.

Стимуляція росту рослин. Окремі штами *Trichoderma* здатні продукувати фітогормони (ауксини, цитокініни, гібереліни), вітаміни та амінокислоти, що сприяють розвитку кореневої системи та підвищують стійкість культур до стресових умов. *Trichoderma* росте на поверхні коренів, де забезпечує контроль захворювань та посилює ріст коренів. Позитивний вплив на рослини проявляється у стимуляції росту та захисті від грибкових і бактеріальних патогенів [22].

Вимоги до інокуляції та закладання в ґрунт. Ефективність використання *Trichoderma* як біодеструктора та біоконтролюючого агента значною мірою залежить від дотримання технологічних вимог до його внесення. Спори *Trichoderma* є надзвичайно чутливими до ультрафіолетового випромінювання — під дією прямого сонячного світла вони втрачають життєздатність за лічені хвилини. Тому внесення біопрепаратів на основі *Trichoderma* має відбуватися в умовах, що унеможливають вплив УФ-випромінювання, або у вечірній та ранковий час. Крім того, поверхнєве нанесення суспензії спор на суху неподрібнену соломку не забезпечує достатнього контакту міцелію з внутрішніми тканинами стебел, де зосереджена основна маса лігноцелюлозних сполук [23].

Оптимальним є внесення біопрепарату безпосередньо в зону подрібнення, на свіжий зріз стебел, що забезпечує максимальну площу контакту та захист спор від згубного впливу сонячної радіації. Для успішної колонізації субстрату *Trichoderma* необхідні також достатня вологість (не менше 50–60 % від повної вологості) та аерація ґрунту. Температурний оптимум для росту більшості видів *Trichoderma* становить 25–30 °С, що відповідає температурному режиму ґрунту в теплу пору року. Найкраще проводити обробку біодеструктором за 10–14 днів до висіву — цього періоду буде достатньо, щоб у повній мірі запустити процес деструкції

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Огляд існуючих конструкцій подрібнювачів рослинних решток та обприскувальних систем для внесення біопрепаратів

Класифікація подрібнювачів рослинних решток. Сучасні подрібнювачі рослинних решток (мульчери) класифікуються за низкою ознак: способом агрегування (навісні, напівнавісні, причіпні), типом робочого органу (роторні, дискові, барабанні), конструкцією ріжучого апарату (ножі, молотки, Y-подібні ножі), робочою шириною захвату та потужністю двигуна [22] (рисунк 1.3).



Рисунок 1.3 – Аналіз існуючих конструкцій подрібнювачів рослинних решток

Роторні подрібнювачі є найпоширенішим типом, оскільки забезпечують високу якість подрібнення та продуктивність. Конструкція такого мульчера, як правило, являє собою масивний ротор, на якому рухомо або жорстко закріплені робочі органи. Рухоме кріплення молотків або Y-подібних ножів забезпечує їх самоочищення та знижує ризик поломок при зіткненні з твердими предметами. Роторні мульчери оснащені горизонтальним валом із ножами, що швидко обертаються, і є ефективними для скошування трави, подрібнення бур'янів, кукурудзи та інших високостеблових культур [22].

Дискові подрібнювачі-розподільувачі використовуються переважно для подрібнення стерні та пожнивних решток на невеликих площах. Деякі моделі здатні справлятися навіть із подрібненням порослі молодих дерев діаметром до 8 см. Проте дискові подрібнювачі поступаються роторним за продуктивністю та якістю подрібнення.

Барабанні подрібнювачі використовуються для подрібнення великих обсягів грубих рослинних решток, зокрема в лісовому господарстві.

Аналіз конструкцій провідних виробників. Серед провідних світових виробників подрібнювачів рослинних решток слід відзначити компанії KUHN, BEDNAR, RÖTTINGER та ін.

Подрібнювачі KUHN серії RMS. Мульчувач KUHN RMS 820 є одним із найпотужніших представників цього класу техніки. Робоча ширина захвату становить 8,20 м, що ідеально підходить для інтенсивної роботи на великих площах. Агрегат розрахований на роботу з потужними тракторами до 450 к.с. (330 кВт). Машина має міцну зварну раму, що складається з чотирьох балок для підвищеної жорсткості. Діаметр ротора з ніжками становить 728–730 мм. Привід здійснюється від вала відбору потужності (ВВП) з частотою обертання 1000 об/хв. Швидкість обертання ротора при 1000 об/хв ВВП становить 1721 об/хв, що забезпечує лінійну швидкість ножа 66 м/с. Конструкція передбачає спіральне розташування Y-подібних ножів, що забезпечує оптимальне подрібнення. Маса агрегату становить 6600 кг. Товщина стінки труби ротора — 12 мм. Завдяки подвійному приводу розподіл потужності до приводних компонентів покращено: з кожного боку ротор приводиться в рух шістьма високопотужними пасами SPBX з автоматичним пристроєм натягу. Висота подрібнення контролюється чотирма поворотними колесами [1, 2].

Роторні мульчувачі BEDNAR. Роторний мульчувач BEDNAR поєднує в собі центральну крокуючу вісь та бокові заслони, що забезпечує ефективне подрібнення та рівномірний розподіл решток по поверхні поля [5].

Причипні подрібнювачі. Причипний подрібнювач OSCAR ПП-6 має продуктивність 7,2–9,5 га/год при робочій швидкості 10–15 км/год та

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспортній швидкості 20 км/год. Робоча ширина захвату становить 6 м. Агрегатується з трактором потужністю від 80 к.с.. Діаметр робочих органів (барабанів з ножами) становить 515 мм. Існують також моделі з робочою шириною 9,2 м (ПП-9.2) з продуктивністю 9,5–15 га/год [6].

Системи внесення біопрепаратів. Традиційне внесення рідких біопрепаратів у сільському господарстві здійснюється за допомогою польових обприскувачів. Такі системи включають бак для робочої рідини, насос високого тиску, систему фільтрації, штангу з форсунками та контролер витрати рідини.

Сучасні обприскувачі оснащуються системами автоматичного контролю до 48 окремих секцій/рядів, що дозволяє уникати подвійного внесення препаратів та забезпечує точність внесення. Використання GPS-карт дає змогу коригувати норми внесення відповідно до просторової неоднорідності полів. Система vApplyHD забезпечує точний контроль і дозування норми виливу при внесенні рідких добрив. Система «Record» дозволяє впровадити технологію внесення рідких добрив на просапних сівалках і посівних комплексах, де добриво працює безпосередньо [10].

Системи внесення рідких добрив та біопрепаратів дедалі частіше інтегруються безпосередньо в робочі органи ґрунтообробних та посівних агрегатів. Так, культиватори та сівалки оснащуються системами для внесення рідких добрив незалежно від виробника. Комплекти для модернізації культиваторів КРН 5.6 під внесення рідких добрив дозволяють суміщати механічну обробку ґрунту з внесенням робочих рідин. Система може включати баки об'ємом 500 л та форсунки для внесення добрив [11].

Недоліки існуючих систем та обґрунтування необхідності розробки комбінованого агрегату. Аналіз існуючих конструкцій подрібнювачів рослинних решток та систем внесення біопрепаратів дозволяє виявити низку суттєвих недоліків:

1. *Роздільність технологічних операцій.* У більшості випадків подрібнення рослинних решток та внесення біопрепаратів виконуються різними агрегатами в

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різні строки, що збільшує кількість проходів техніки по полю, ущільнює ґрунт та підвищує витрати пального.

2. *Відсутність захисту від ультрафіолету.* Внесення біопрепаратів відкритими обприскувачами призводить до значних втрат життєздатності спор *Trichoderma* під впливом сонячного випромінювання.

3. *Недостатній контакт препарату з субстратом.* Поверхнєве нанесення суспензії на неподрібнену солому не забезпечує проникнення спор у внутрішні тканини стебел, де зосереджена основна маса лігноцелюлозних сполук.

4. *Відсутність пропорційного дозування.* Існуючі системи внесення рідких препаратів не завжди забезпечують автоматичне коригування норми внесення залежно від швидкості руху агрегату та щільності рослинних решток.

5. *Ризик засмічення форсунок.* Біологічні суспензії містять спори, поживне середовище та інші компоненти, що можуть спричиняти засмічення фільтрувальних елементів та робочих отворів форсунок, особливо при коливаннях тиску в гідравлічній системі.

6. *Необхідність додаткового внесення азоту.* При заорюванні непідготовленої соломи виникає потреба у внесенні додаткових доз азотних добрив (10 кг азоту на кожну тону соломи) для компенсації іммобілізації азоту, що в умовах дефіциту мінеральних добрив стає економічно обтяжливим.

Саме ці недоліки зумовлюють необхідність розробки мобільного подрібнювача рослинних решток з інтегрованою системою інокуляції, яка забезпечує одночасне механічне подрібнення та нанесення суспензії *Trichoderma* безпосередньо в зоні кришення під захисним кожухом.

На основі проведеного аналізу агротехнічного та екологічного значення соломи як органічного добрива, біологічних особливостей деструкції рослинних решток грибами роду *Trichoderma* та огляду існуючих конструкцій подрібнювачів і систем внесення біопрепаратів можна зробити такі висновки:

1. Солома є цінним джерелом органічної речовини, що за своєю поживною цінністю перевищує традиційні органічні добрива в 3,5–4 рази. Систематичне

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

внесення соломи в ґрунт забезпечує відновлення 30–40 % родючості та підтримання бездефіцитного балансу гумусу. Проте природне розкладання соломи триває 3–5 років і супроводжується імобілізацією азоту (10 кг азоту на 1 т соломи) та накопиченням фітопатогенів.

2. Гриби роду *Trichoderma* є ефективними агентами біологічної деструкції лігноцелюлозних субстратів завдяки здатності синтезувати комплекс целюлаз, геміцелюлаз та інших гідролітичних ферментів, а також антагоністами ґрунтових патогенів. Їх використання дозволяє прискорити мінералізацію соломи до одного вегетаційного періоду та знизити інфекційний фон ґрунту. Однак традиційне внесення біопрепаратів має низьку ефективність через чутливість спор до ультрафіолету та недостатній контакт із субстратом.

3. Аналіз існуючих конструкцій подрібнювачів (KUNH RMS 820, BEDNAR, OSCAR ПП-6 та ін.) показав, що вони забезпечують високу якість механічного подрібнення рослинних решток, проте не передбачають інтегрованої системи інокуляції біопрепаратами. Наявні системи внесення рідких препаратів, як правило, є окремими агрегатами або адаптовані для внесення мінеральних добрив і не враховують специфіку біологічних суспензій.

Таким чином, існує об'єктивна науково-технічна суперечність між потенціалом біологічної деструкції соломи за допомогою *Trichoderma* та відсутністю технічних засобів, що забезпечують ефективне поєднання механічного подрібнення та інокуляції рослинних решток у єдиному технологічному циклі з урахуванням біологічних особливостей препарату та кінематичних параметрів робочих органів.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

На основі проведеного аналізу агротехнічного та екологічного значення використання соломи як органічного добрива, біологічних особливостей деструкції рослинних решток грибами роду *Trichoderma*, а також огляду існуючих конструкцій подрібнювачів та систем внесення рідких препаратів можна зробити такі висновки:

1. Агротехнічне та екологічне значення соломи. Солома є найбільш доступним і вагомим ресурсом для відтворення органічної речовини ґрунту, що за своєю поживною цінністю в 3,5–4 рази перевищує традиційні органічні добрива. Систематичне внесення соломи до ґрунту забезпечує повернення 15–20 кг/га азоту, 8–10 кг/га фосфору та 30–40 кг/га калію, сприяє відновленню 30–40 % родючості та підтриманню бездефіцитного балансу гумусу. Проте природний процес розкладання соломи триває 3–5 років, супроводжується іммобілізацією азоту (до 10 кг на 1 т соломи) та накопиченням фітопатогенів, що створює агротехнічні та екологічні ризики.

2. Біологічний потенціал грибів роду *Trichoderma*. Гриби роду *Trichoderma* є ефективними біодеструкторами лігноцелюлозних субстратів завдяки здатності синтезувати комплекс гідролітичних ферментів (целюлаз, геміцелюлаз, лігніназ) та проявляють виражену антагоністичну активність щодо ґрунтових патогенів (збудників фузаріозу, корневих гнилей тощо). Вони прискорюють мінералізацію соломи до одного вегетаційного періоду, знижують інфекційний фон ґрунту, стимулюють ріст рослин завдяки продукції фітогормонів. Однак ефективність традиційного внесення біопрепаратів є низькою через надзвичайну чутливість спор до ультрафіолетового випромінювання (втрата життєздатності за лічені хвилини) та недостатній контакт препарату з внутрішніми тканинами неподрібнених стебел, де зосереджена основна маса лігноцелюлози.

3. Аналіз існуючих технічних засобів. Огляд конструкцій провідних виробників (KUNH RMS 820, BEDNAR, OSCAR ПП-6 та ін.) показав, що сучасні

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роторні подрібнювачі забезпечують високу якість механічного подрібнення пожнивних решток завдяки великій лінійній швидкості ножів (45–70 м/с) та спіральному розташуванню робочих органів. Водночас наявні системи внесення рідких препаратів, як правило, є окремими агрегатами (польові обприскувачі) або адаптовані для внесення мінеральних добрив і не враховують специфіку біологічних суспензій. Основними недоліками є: роздільність технологічних операцій, відсутність захисту від ультрафіолету, недостатній контакт препарату з субстратом, відсутність пропорційного дозування залежно від швидкості руху та щільності решток, а також ризик засмічення форсунок біоматеріалом.

4. Обґрунтування науково-технічної проблеми. Виявлено об'єктивну суперечність між високим потенціалом біологічної деструкції соломи за допомогою *Trichoderma* та відсутністю технічних засобів, що забезпечують ефективне поєднання механічного подрібнення й інокуляції в єдиному технологічному циклі з урахуванням біологічних особливостей препарату та кінематичних параметрів робочих органів.

5. Визначення напрямку дослідження. Результати аналізу підтверджують необхідність розробки мобільного роторного подрібнювача з інтегрованою системою інокуляції, яка забезпечує: одночасне подрібнення та обробку біопрепаратом під захисним кожухом (захист від УФ); точне пропорційне дозування суспензії залежно від швидкості руху та щільності решток; стабільність гідравлічних параметрів для запобігання розстроюванню системи. Це дозволить підвищити ефективність біодеструкції, скоротити строки розкладання соломи, зменшити потребу в мінеральних азотних добривах та оздоровити фітосанітарний стан ґрунтів.

Таким чином, проведений аналіз повною мірою обґрунтовує актуальність обраної теми та визначає мету й завдання подальших досліджень, які будуть реалізовані в наступних розділах кваліфікаційної роботи.

					14.17 - КР.017.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ТА ІНОКУЛЯЦІЇ

2.1 Кінематика різання та динаміка взаємодії Y-подібних ножів ротора із соломистим матеріалом

Конструктивні особливості робочого органу та обґрунтування вибору Y-подібних ножів

Робочим органом мобільного подрібнювача є збалансований горизонтальний ротор із шарнірно встановленими Y-подібними ножами, які здійснюють підрізання та подрібнення рослинних решток безпосередньо з поверхні поля. Вибір Y-подібних ножів як основних ріжучих елементів зумовлений їхніми конструктивними та експлуатаційними перевагами перед іншими типами робочих органів (молотками, прямими ножами, L-подібними ножами) [3, 8]. Y-подібні ножі характеризуються роздвоєною формою робочої частини, що забезпечує подвійну ріжучу кромку на кожному ножі. Така конструкція сприяє більш ефективному захопленню та утриманню рослинної маси в зоні різання, зменшує ймовірність проковзування стебел уздовж ножа та підвищує якість подрібнення. Для подрібнення м'якших пожнивних залишків (соломи зернових, стебел соняшнику, трави) Y-подібні ножі є оптимальним вибором, оскільки забезпечують необхідну якість різання при менших енергетичних витратах порівняно з молотками.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Обуховський			РОЗДІЛ 2			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								26	15
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Шарнірне кріплення ножів на роторі є важливою конструктивною особливістю, що забезпечує:

- *самоочищення* ножів від налипання рослинної маси та ґрунту за рахунок відцентрової сили, яка розпрямляє ножі під час обертання;
- *зниження ризику поломок* при зіткненні з твердими предметами (каміння, металеві включення) — ножі відхиляються назад, амортизуючи удар;
- *автоматичне регулювання* кута атаки залежно від щільності та вологості матеріалу, що забезпечує адаптивність робочого процесу.

Ротор подрібнювача, як правило, виготовляється з товстостінної труби діаметром 170–200 мм, на якій у шаховому або спіральному порядку розміщуються Y-подібні ножі. Спіральне розташування ножів забезпечує рівномірне навантаження на ротор, зменшує пульсації крутного моменту та сприяє стабільній роботі приводу.

Кінематичний аналіз руху ріжучої кромки ножа.

Для математичного опису траєкторії руху крайньої точки Y-подібного ножа введемо двовимірну декартову систему координат OXY , де вісь OX збігається з вектором поступальної швидкості руху агрегату v_a (м/с), а вісь OY орієнтована вертикально вгору. Початок координат розмістимо в точці проекції осі обертання ротора на поверхню ґрунту.

Траєкторія руху крайньої ріжучої точки ножа радіусом R_r (м) при кутовій швидкості обертання ω_r (рад/с) описується параметричними рівняннями трохоїди:

$$x(t) = v_a \cdot t + R_r \cdot \cos(\omega_r \cdot t + \varphi_0) \quad (2.1)$$

$$y(t) = R_r \cdot \sin(\omega_r \cdot t + \varphi_0) + H_r \quad (2.2)$$

де: t — поточний час, с; φ_0 — початкова фаза, що визначає положення ножа в момент $t = 0$; H_r — висота розташування осі обертання ротора над поверхнею ґрунту, м.

Параметр H_r визначає глибину обробки рослинних решток і встановлюється в межах 0,05–0,15 м залежно від типу та стану пожнивних

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залишків. Чим більша глибина обробки, тим більша частина стебел піддається різанню, проте зростає і ризик забивання ротора ґрунтом.

Для оцінки кінематичних характеристик руху ножа визначимо проекції лінійної швидкості ріжучої точки на координатні осі:

$$v_x(t) = \frac{dx}{dt} = v_a - R_r \cdot \omega_r \cdot \sin(\omega_r \cdot t + \varphi_0)$$

$$v_y(t) = \frac{dy}{dt} = R_r \cdot \omega_r \cdot \cos(\omega_r \cdot t + \varphi_0)$$

Модуль абсолютної лінійної швидкості різання v_{cut} (м/с) в момент безпосереднього контакту з рослинним матеріалом визначається як:

$$v_{cut} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(v_a - R_r \cdot \omega_r \cdot \sin(\omega_r \cdot t + \varphi_0))^2 + (R_r \cdot \omega_r \cdot \cos(\omega_r \cdot t + \varphi_0))^2}$$

Спрощуючи вираз, отримуємо:

$$v_{cut} = \sqrt{v_a^2 - 2 \cdot v_a \cdot R_r \cdot \omega_r \cdot \sin(\omega_r \cdot t + \varphi_0) + (R_r \cdot \omega_r)^2}$$

Для якісного безпідпiрного різання колова швидкість ножів ротора суттєво перевищує швидкість руху МТА ($R_r \cdot \omega_r \gg v_a$). У сучасних роторних подрібнювачах лінійна швидкість ножа становить 45–70 м/с при швидкості руху агрегату 8–15 км/год (2,2–4,2 м/с). За таких умов внеском поступальної швидкості можна знехтувати, і лінійну швидкість різання приймають рівною коловій:

$$v_{cut} \approx R_r \cdot \omega_r = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n_r}{60}, \quad (2.2)$$

де: $D_r = 2 \cdot R_r$ — діаметр ротора, м; n_r — частота обертання ротора, об/хв.

Для подрібнювача KUHN RMS 820 при діаметрі ротора 0,728 м та частоті обертання 1721 об/хв лінійна швидкість ножа становить:

$$v_{cut} = \frac{\pi \cdot 0,728 \cdot 1721}{60} \approx 65,6 \text{ м/с}$$

що узгоджується з паспортними даними (66 м/с).

Кінематичний коефіцієнт ротора та умови безперервного різання

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Важливою кінематичною характеристикою роторного подрібнювача є кінематичний коефіцієнт λ , що визначається як відношення колової швидкості ножів до поступальної швидкості агрегату:

$$\lambda = \frac{R_r \cdot \omega_r}{v_a}, \quad (2.3)$$

Кінематичний коефіцієнт визначає характер траєкторії руху ножа відносно ґрунту та рослинних решток. При $\lambda > 1$ траєкторія ножа має петлеподібну форму з ділянками, де ножі рухаються назустріч напрямку руху агрегату, що забезпечує ефективне підрізання стебел. Для роторних подрібнювачів значення λ зазвичай становить 10–30, що гарантує багаторазове перекриття траєкторій сусідніх ножів та високу якість подрібнення.

Крок між суміжними траєкторіями ножів S_t (м) визначається як:

$$S_t = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_a}{z \cdot \omega_r}, \quad (2.4)$$

де z — кількість ножів на роторі.

Для забезпечення суцільного різання без пропусків необхідно, щоб крок між траєкторіями не перевищував ширину зони деформації матеріалу, що залежить від типу та стану рослинних решток.

Динаміка взаємодії ножа з рослинним матеріалом

Процес різання стебла соломи Y-подібним ножем є складним динамічним явищем, що супроводжується пружно-пластичними деформаціями, руйнуванням клітинних стінок та відділенням частинки матеріалу. Для опису цього процесу розглянемо сили, що діють на ножі в процесі роботи.

Зусилля різання стебла соломи F_{cut} (Н) залежить від питомого опору матеріалу руйнуванню q_{cut} (Дж/м²) та площі поперечного перерізу зрізу S_{cut} (м²). Для стебел зернових культур питомий опір різанню становить $q_{cut} = 0,5 \dots 1,5$ МДж/м² залежно від вологості, сорту та фази вегетації. Миттєве значення зусилля різання можна визначити як:

$$F_{cut}(t) = q_{cut} \cdot \frac{dS_{cut}}{dt} \cdot \frac{1}{v_{cut}(t)}, \quad (2.5)$$

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Де $\frac{dS_{cut}}{dt}$ – швидкість зміни площі контакту ножа з матеріалом, м²/с.

Для практичних розрахунків часто використовують спрощену залежність середнього зусилля різання від діаметра стебла d_{st} (м) та межі міцності на зріз τ_{cut} (Па):

$$\bar{F}_{cut} = \frac{\pi \cdot d_{st}^2}{4} \cdot \tau_{cut} \quad (2.6)$$

Для соломи пшениці при $d_{st} = 3 \dots 5$ мм та $\tau_{cut} = 5 \dots 15$ МПа середнє зусилля різання становить 35–300 Н.

Окрім зусилля різання, на ножі діють:

- відцентрова сила $F_{cf} = m_b \cdot R_r \cdot \omega_r^2$, де m_b — маса ножа, кг, яка забезпечує розпрямлення ножа та його притискання до матеріалу;
- сила тертя $F_{fr} = f \cdot F_{cut}$ об ніж об рослинну масу, де f — коефіцієнт тертя (0,3–0,6);
- сила опору повітря $F_{air} = 0,5 \cdot C_d \cdot \rho_{air} \cdot A_b \cdot v_{cut}^2$, де C_d — коефіцієнт лобового опору, ρ_{air} — густина повітря, A_b — площа проекції ножа.

Енергетичні параметри роботи ротора

Для стабільної безаварійної роботи подрібнювача необхідно, щоб накопичена кінетична енергія обертання ротора забезпечувала подолання пікових навантажень при надходженні великих обсягів матеріалу в робочу камеру.

Момент інерції ротора J_r (кг·м²) визначається як сума моментів інерції вала, труби ротора та ножів. Для спрощених розрахунків ротор розглядають як суцільний циліндр:

$$J_r = \frac{1}{2} \cdot m_r \cdot R_r^2, \quad (2.7)$$

де m_r — маса ротора з ножами, кг.

Кінетична енергія обертання ротора:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J_r \cdot \omega_r^2 \quad (2.8)$$

Для забезпечення подолання пікових навантажень необхідно виконання умови:

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{kin} \geq E_{max} \quad (2.9)$$

де E_{max} — максимальна робота поодинокого руйнування при надходженні граничної маси матеріалу в робочу камеру, Дж.

Величина E_{max} залежить від питомої енергоємності подрібнення E_{sp} (Дж/кг) та максимальної маси матеріалу m_{max} (кг), що одночасно надходить у камеру:

$$E_{max} = E_{sp} \cdot m_{max} \quad (2.10)$$

Питома енергоємність подрібнення соломи становить 5–15 кДж/кг залежно від вологості та фракційного складу.

Потужність, необхідна для приводу ротора P_r (Вт), визначається як:

$$P_r = M_r \cdot \omega_r, \quad (2.11)$$

де M_r — крутний момент на валу ротора, Н·м.

Крутний момент, у свою чергу, визначається сумарним зусиллям різання та радіусом ротора:

$$M_r = z \cdot \bar{F}_{cut} \cdot R_r \cdot k_{load}, \quad (2.12)$$

де $k_{load} = 0,3 \dots 0,7$ — коефіцієнт одночасності навантаження ножів.

Для подрібнювача KUHN RMS 820 з 66 ножами (приблизно 33 пари Y-подібних ножів) та лінійною швидкістю 66 м/с потужність приводу становить близько 250–330 кВт.

Вплив конструктивних параметрів на якість подрібнення

Якість подрібнення рослинних решток оцінюється за такими показниками:

- середня довжина фрагментів l_{avg} (м) — для соломи зернових рекомендована довжина становить 0,05–0,15 м;
- коефіцієнт варіації довжини C_v — характеризує однорідність подрібнення;
- ступінь подрібнення $i = l_{max}/l_{min}$.

На якість подрібнення впливають такі конструктивні та режимні параметри:

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- частота обертання ротора n_r — зі збільшенням частоти покращується якість подрібнення, проте зростають енергетичні витрати та знос ножів;
- кількість ножів z — більша кількість ножів забезпечує менший крок різання та кращу якість, але збільшує масу ротора та момент інерції;
- кут загострення ножа α — оптимальний кут становить $25\text{--}35^\circ$; менший кут покращує різання, але знижує міцність ножа;
- зазор між ножами та протиризальною пластиною δ — рекомендується в межах 1–3 мм для забезпечення ефективного зрізання без заклинювання.

Дослідження показують, що підвищення швидкості руху подрібнювачів та збільшення кута розхилу між ножами сприяють зменшенню забивання міжножового простору рослинно-ґрунтовою масою.

2.2 Математичне моделювання гідродинамічних параметрів напірного розпилення спорової суспензії в зоні кришення

Конструктивна схема системи інокуляції та вимоги до розпилення

Нанесення робочого розчину деструктора на основі *Trichoderma* здійснюється через систему плоскофакельних форсунок, розміщених у задній частині захисного кожуха подрібнювача, безпосередньо в зоні викиду зрізаних та розщеплених часток стебел. Таке компонування забезпечує:

- захист спор від ультрафіолетового випромінювання — обробка відбувається під кожухом, що унеможливорює пряме сонячне опромінення;
- максимальний контакт препарату з субстратом — розпилення здійснюється на свіжий зріз стебел, де відсутній восковий наліт та полегшено проникнення рідини;
- оптимальні умови для адгезії спор — вологе середовище в зоні подрібнення сприяє набуханням та активації спор.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Плоскофакельні (плоскоструминні) форсунки є найбільш затребуваним типом розпилювачів у сільськогосподарському обприскуванні, оскільки формують струмінь рідини у вигляді плоского факела або віялоподібний, що забезпечує рівномірне покриття оброблюваної поверхні.

Гідродинаміка витікання рідини через сопло форсунки

Швидкість витікання суспензії з сопла форсунки v_{fluid} (м/с) залежить від робочого тиску в напірній магістралі p (Па) та визначається за законом Торрічеллі з урахуванням коефіцієнта витрати:

$$v_{fluid} = \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_{fluid}}}, \quad (2.13)$$

де: μ – коефіцієнт витрати вихідного отвору форсунки (для плоскоструминних форсунок $\mu = 0,65 \dots 0,85$); ρ_{fluid} – густина робочого розчину деструктора, кг/м³ (для водних суспензій $\rho_{fluid} \approx 1000 \dots 1050$ кг/м³).

Об'ємна витрата рідини через одну форсунку q_f (м³/с) визначається як:

$$q_f = \mu \cdot A_{orf} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_{fluid}}}, \quad (2.14)$$

де $A_{orf} = \frac{\pi \cdot d_{orf}^2}{4}$ — площа поперечного перерізу вихідного отвору сопла, м²; d_{orf} — діаметр отвору, м.

Сумарна витрата рідини через усі форсунки:

$$Q_{\Sigma} = n_f \cdot q_f, \quad (2.15)$$

де n_f — кількість активних форсунок.

Дисперсність факела розпилення та фактори, що впливають на розмір крапель

Середній медіанний діаметр крапель D_{drop} (мкм) є визначальним чинником утримання спорової маси на стеблах. Розмір крапель впливає на:

- *покриття поверхні* — дрібні краплі забезпечують більшу площу покриття при однаковому об'ємі рідини;
- *адгезію до субстрату* — краплі оптимального розміру краще утримуються на поверхні стебел;

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *стійкість до зносу вітром* — дрібні краплі більш схильні до зносу повітряними потоками.

Залежність діаметра крапель від тиску описується емпіричним рівнянням:

$$D_{drop} = \frac{C_{form}}{p^k}, \quad (2.16)$$

де: C_{form} – конструктивний коефіцієнт форми сопла, що залежить від геометрії вихідного отвору та кута розпилення; k – показник ступеня деградації струменя ($k \approx 0,33 \dots 0,45$).

Для плоскоструминних форсунок з кутом розпилення $65\text{--}110^\circ$ коефіцієнт C_{form} становить 150–300 при вимірюванні D_{drop} у мкм та p у МПа.

Дрібні краплі ($D_{drop} < 150$ мкм) утворюють туман і виносяться за межі кожуха повітряним вихором ротора. Завеликі краплі ($D_{drop} > 400$ мкм) скочуються з воскового шару соломи на ґрунт. Раціональним є робочий тиск $0,2 \dots 0,4$ МПа, що гарантує отримання крапель розміром $250 \dots 350$ мкм та забезпечує стабільність їх осідання на вологому внутрішньому зрізі подрібненого стебла.

Гідродинамічні втрати в напірній магістралі (рисунки 2.2).

При русі суспензії по трубопроводах виникають гідравлічні втрати, які необхідно враховувати при виборі насоса та розрахунку робочого тиску. Сумарні втрати тиску Δp_{total} (Па) складаються з:

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{fr} + \Delta p_{loc}, \quad (2.17)$$

де Δp_{fr} — втрати на тертя по довжині трубопроводу, Па; Δp_{loc} — місцеві втрати (в колінах, трійниках, фільтрах, запірній арматурі), Па.

Втрати на тертя визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta p_{fr} = \lambda \cdot \frac{L_{pipe}}{d_{pipe}} \cdot \frac{\rho_{fluid} \cdot v_{pipe}^2}{2}, \quad (2.18)$$

де: λ — коефіцієнт гідравлічного тертя (для турбулентного режиму $\lambda = 0,02 \dots 0,04$); L_{pipe} — довжина трубопроводу, м; d_{pipe} — внутрішній діаметр трубопроводу, м; v_{pipe} — середня швидкість руху рідини в трубопроводі, м/с.

Швидкість рідини в трубопроводі визначається з рівняння нерозривності:

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_{pipe} = \frac{4 \cdot Q_{\Sigma}}{\pi \cdot d_{pipe}^2} \quad (2.19)$$

Місцеві втрати розраховуються як:

$$\Delta p_{loc} = \sum \zeta_i \cdot \frac{\rho_{fluid} \cdot v_{pipe}^2}{2} \quad (2.20)$$

де ζ_i — коефіцієнти місцевих опорів.

Вплив реологічних властивостей суспензії на процес розпилення

Суспензія спор *Trichoderma* є неньютонівською рідиною, реологічні властивості якої залежать від:

- *концентрації спор* — зі збільшенням концентрації зростає в'язкість;
- *наявності поживного середовища* — додавання органічних компонентів змінює реологічні характеристики;
- *температури* — з підвищенням температури в'язкість знижується.

Для опису реологічної поведінки суспензії використовують модель степеневого рідинного закону Оствальда-де Ваале:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.21)$$

де: τ — напруження зсуву, Па; K — коефіцієнт консистенції, Па·с ^{n} ; $\dot{\gamma}$ — швидкість зсуву, с ^{-1} ; n — індекс течії (для $n < 1$).

Ефективна в'язкість суспензії визначається як:

$$\eta_{eff} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.22)$$

Зі збільшенням швидкості зсуву (що має місце при витіканні через сопло форсунки) ефективна в'язкість псевдопластичних суспензій зменшується, що полегшує розпилення. Однак при високих швидкостях зсуву може відбуватися руйнування спор, тому необхідно обмежувати максимальний тиск у системі.

Математична модель розподілу рідини в факелі розпилення

Розподіл об'ємної витрати рідини в поперечному перерізі плоскофакельного розпилення описується функцією щільності розподілу $f(y)$, де y — відстань від осі факела:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma^2} \right), \quad (2.23)$$

де σ — параметр розсіювання, що залежить від кута розпилення θ та відстані від форсунки до поверхні L_f :

$$\sigma = \frac{L_f \cdot \tan(\theta/2)}{\sqrt{2 \cdot \ln(2)}}, \quad (2.24)$$

Для забезпечення рівномірного покриття всієї ширини оброблюваної зони необхідно, щоб факели сусідніх форсунок перекривалися на 20–30 %.

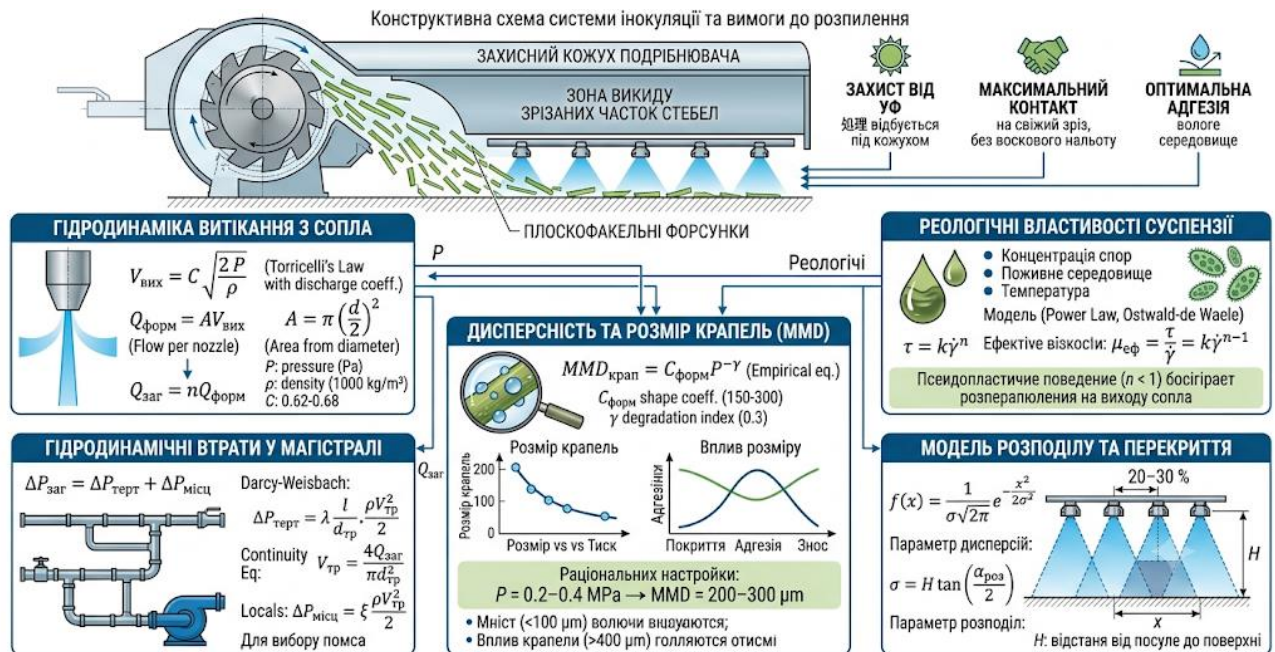


Рисунок 2.2 – Математичне моделювання гідродинамічних параметрів напірного розпилення

2.3 Інформаційно-енергетична взаємодія технічних систем: узгодження швидкості руху МТА, завантаження ротора та секундної витрати інокуляту за допомогою електронної системи дозування

Концепція інформаційно-енергетичної взаємодії

Продуктивність та якість інокуляції біопрепаратом базуються на жорсткому узгодженні витрати рідини з кількістю оброблюваного матеріалу. Внутрішня взаємодія технічних систем описується математичним зв'язком між швидкістю руху МТА, щільністю рослинних решток та параметрами роботи електронно-гідралічного дозатора.

Сучасні системи точного внесення рідких препаратів забезпечують точний контроль і дозування норми виливу під час внесення рідких комплексних добрив, мікродобрив та інших рідин. Основним принципом роботи таких систем є автоматична компенсація коливань швидкості руху для підтримання заданої норми внесення.

Математична модель формування норми внесення

Обсяг надходження подрібнюваної біомаси в камеру за одиницю часу $M_{bio}(t)$ (кг/с) є динамічною величиною, що залежить від:

$$M_{bio}(t) = B_{sh} \cdot v_a(t) \cdot m_{res}(x, y) \quad (2.25)$$

де: B_{sh} – робоча ширина захвату подрібнювача, м; $v_a(t)$ – миттєва швидкість руху агрегату, м/с; $m_{res}(x, y)$ – щільність розподілу поживних решток на поверхні поля, кг/м².

Щільність розподілу решток $m_{res}(x, y)$ є просторово-неоднорідною величиною, що залежить від:

- врожайності культури;
- рівномірності розподілу соломи комбайном;
- рельєфу поля;
- попередніх агротехнічних заходів.

Для практичних розрахунків використовують усереднене значення $m_{res} = 0,5 \dots 2,5$ кг/м² залежно від культури та врожайності.

Задана агротехнічна норма внесення інокуляту N_{dose} (л/т сухої речовини соломи) визначає необхідну секундну витрату рідини:

$$Q_{set}(t) = M_{bio}(t) \cdot N_{dose} = B_{sh} \cdot v_a(t) \cdot m_{res}(x, y) \cdot N_{dose}$$

Для підтримання стабільної дози внесення корисних спор на одиницю маси соломи електронний блок керування (ECU) у реальному часі коригує сумарну секундну витрату рідини через форсунки $Q_{\Sigma}(t)$ відповідно до коливань швидкості руху $v_a(t)$ та просторової неоднорідності $m_{res}(x, y)$:

$$Q_{\Sigma}(t) = Q_{set}(t) \pm \Delta Q_{corr}(t), \quad (2.26)$$

де $\Delta Q_{corr}(t)$ — коригувальна добавка, що компенсує відхилення фактичної витрати від заданої

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ		Аркуш
							37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Структура системи автоматичного дозування

Система автоматичного пропорційного дозування інокуляту складається з таких функціональних блоків (рисунк 2.3):

1. *Датчик швидкості руху* — вимірює миттєву швидкість $v_a(t)$ (зазвичай радарний або GPS-датчик).
2. *Датчик витрати рідини* — вимірює фактичну секундну витрату $Q_{\Sigma}(t)$ (електромагнітний або ультразвуковий витратомір).
3. *Датчик тиску* — контролює робочий тиск $p(t)$ у напірній магістралі.
4. *Мікроконтролер (ECU)* — обробляє вхідні сигнали, обчислює необхідну витрату та формує керувальні сигнали на виконавчі механізми.
5. *Регульований насос* — змінює подачу рідини пропорційно керувальному сигналу (частотно-регульований електродвигун або пропорційний гідравлічний привід).
6. *Байпасний клапан* — забезпечує скидання надлишку рідини в бак при зменшенні потреби.
7. *Електричні клапани форсунок* — дозволяють відключати окремі форсунки при зменшенні ширини оброблюваної зони.



Рисунок 2.3 – Інформаційно-енергетична взаємодія технічних систем

Алгоритм роботи системи:

1. Зчитування сигналів з датчиків швидкості та витрати.
2. Обчислення необхідної витрати $Q_{set}(t)$ за формулою.
3. Порівняння $Q_{set}(t)$ з фактичною витратою $Q_{\Sigma}(t)$.
4. Формування сигналу помилки $\varepsilon(t) = Q_{set}(t) - Q_{\Sigma}(t)$.
5. Коригування частоти обертів насоса або положення байпасного клапана за ПД-законом:

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (2.27)$$

де K_p, K_i, K_d — коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових регулятора.

Врахування просторової неоднорідності рослинних решток

Для врахування просторової неоднорідності щільності рослинних решток $m_{res}(x, y)$ система може бути доповнена:

- сенсорами щільності біомаси (оптичними, ультразвуковими або радарними), що встановлюються перед ротором;
- картами врожайності попередніх років (технологія точного землеробства);
- супутниковими знімками для оцінки стану посівів перед збиранням.

Інтеграція цих даних дозволяє формувати карти-завдання для диференційованого внесення інокуляту, що підвищує ефективність використання біопрепарату.

Інформаційна взаємодія з системою керування трактором

Сучасні системи автоматичного дозування інтегруються з бортовою електронікою трактора через стандартизовані протоколи (ISOBUS, CAN-bus). Це забезпечує:

- автоматичне зчитування швидкості руху з шини даних трактора;
- синхронізацію з системами автоматичного водіння (Autopilot);
- дистанційний моніторинг та діагностику роботи системи;
- реєстрацію та документування виконаних робіт.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Динаміка рідинного контуру: запобігання розстроюванню дисперсності факела розпилу при коливаннях тиску та забиванні сопел

Специфіка роботи з біологічними суспензіями та причини розстроювання системи

Специфіка роботи з мікробіологічними суспензіями полягає в наявності у робочій рідині дрібних механічних домішок, спор та поживного середовища грибів, що призводить до поступового засмічення фільтрувальних елементів та робочих отворів сопел форсунок. Основні причини порушення роботи системи інокуляції:

- *забивання форсунок* — спори та частинки поживного середовища осідають на стінках сопла, зменшуючи живий переріз;
- *коливання тиску* — при зміні частоти обертання насоса або відключенні частини форсунок змінюється гідравлічний опір системи;
- *зміна в'язкості суспензії* — з часом суспензія може загустіти внаслідок випаровування води або біохімічних процесів;
- *повітряні пробки* — потрапляння повітря в напірну магістраль порушує стабільність потоку.

Коли частина форсунок забивається або відключається при зменшенні ширини оброблюваного валка, площа живого перерізу виходу рідини різко зменшується. Це призводить до явища, відомого як розстроювання гідравлічної системи: тиск у напірній магістралі $p(t)$ стрімко зростає.

Математична модель динаміки тиску в рідинному контурі

Зміна тиску в напірній магістралі описується диференціальним рівнянням, що враховує стисливість рідини та пружність трубопроводів:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{E_{eq}}{V_{line}} \cdot \left(Q_{pump}(t) - \sum_{i=1}^{n_{act}} q_{f,i}(p) - Q_{bypass}(t) - Q_{leak}(t) \right)$$

де: E_{eq} – еквівалентний об'ємний модуль пружності системи «рідина-трубопровід», Па;

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{E_{fluid}} + \frac{D_{pipe}}{E_{pipe} \cdot \delta_{pipe}}} \quad (2.28)$$

(E_{fluid} — об'ємний модуль пружності робочої рідини, Па; E_{pipe} — модуль пружності матеріалу трубопроводу, Па; D_{pipe} — зовнішній діаметр трубопроводу, м; δ_{pipe} — товщина стінки трубопроводу, м);

- V_{line} — внутрішній об'єм напірних трубопроводів, м³;
- $Q_{pump}(t)$ — миттєва подача рідини насосом, м³/с;
- n_{act} — кількість активних (незасмічених) форсунок;
- $q_{f,i}(p)$ — витрата рідини через i -ту форсунку при тиску p , м³/с;
- $Q_{bypass}(t)$ — витрата рідини через регулювальний байпасний клапан, м³/с;
- $Q_{leak}(t)$ — витрата рідини через нещільності (втрати), м³/с.

Витрата через форсунку при тиску p визначається за формулою:

$$q_{f,i}(p) = \mu_i \cdot A_{orf,i} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_{fluid}}}, \quad (2.28)$$

де μ_i та $A_{orf,i}$ — коефіцієнт витрати та площа отвору i -тої форсунки (зменшуються при забиванні).

Наслідки розстроювання системи для якості інокуляції

Різке зростання тиску $p(t)$ призводить до неконтрольованого зменшення діаметра крапель у форсунках, що залишилися працювати. Згідно з емпіричною залежністю:

$$D_{drop} = \frac{C_{form}}{p^k} \quad (2.29)$$

при зростанні тиску з 0,3 до 0,6 МПа ($k = 0,4$) діаметр крапель зменшується з 300 до приблизно 220 мкм. При подальшому зростанні тиску до 1,0 МПа діаметр крапель може зменшитися до 180 мкм.

Дрібні краплі ($D_{drop} < 150$ мкм) миттєво випаровуються та зносяться повітряними потоками ротора, що спричиняє:

- зменшення фактичної кількості препарату, що досягає поверхні стебел;
- втрату життєздатності спор внаслідок висихання та дії ультрафіолету;
- нерівномірний розподіл інокуляту по поверхні оброблюваної зони.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Окрім того, високий тиск може спричинити механічне пошкодження спор внаслідок гідродинамічного удару при виході з сопла.

Методи запобігання розстроюванню системи (рисунок 2.4).

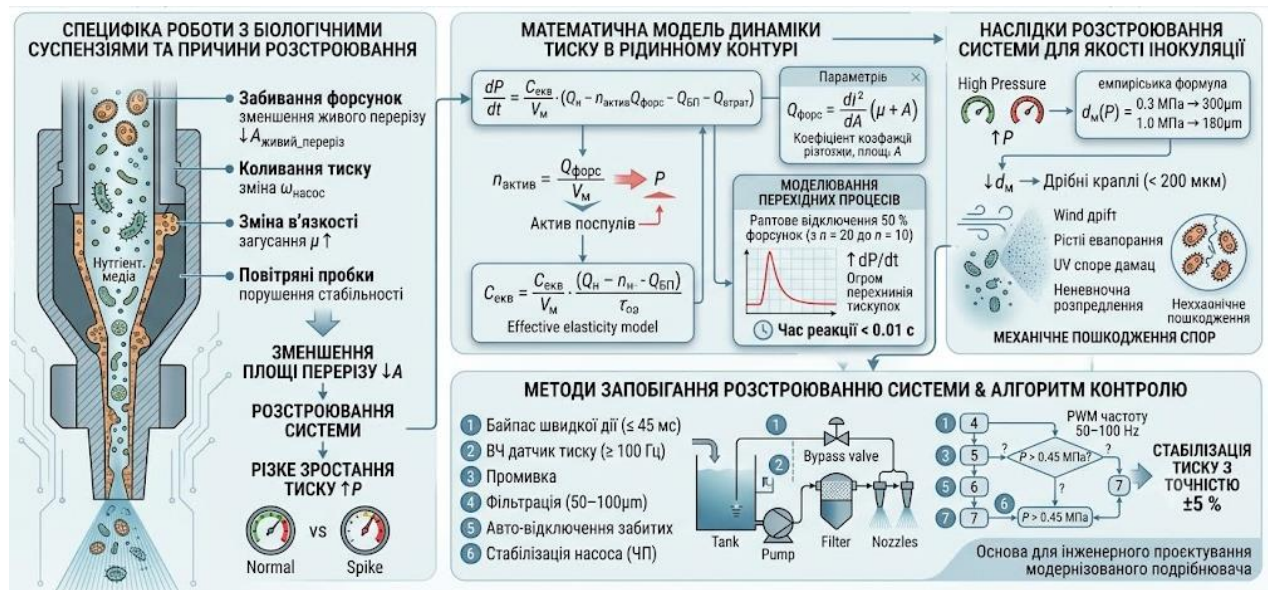


Рисунок 2.4 – Динаміка рідинного контуру

Для запобігання розстроюванню системи застосовуються такі технічні рішення:

1. *Пропорційний електромагнітний байпасний клапан швидкої дії* — при реєстрації зростання тиску понад норму ($p > 0,45 \text{ МПа}$) мікроконтролер миттєво збільшує переріз байпасного клапана, скидаючи надлишок рідини в бак. Час реакції клапана має становити не більше 45 мс.

2. *Датчик тиску з високою частотою опитування* — забезпечує вимірювання тиску з частотою не менше 100 Гц для своєчасного виявлення початку розстроювання.

3. *Система промивки форсунок* — періодичне відкриття форсунок на максимальну витрату для видалення осаду.

4. *Фільтрація суспензії* — встановлення фільтрів з номінальною тонкістю фільтрації, що відповідає діаметру отворів форсунок (зазвичай 50–100 мкм).

5. Автоматичне відключення забитих форсунок — моніторинг витрати через кожну форсунку та відключення тих, що вийшли з ладу, з відповідним перерахунком норми внесення для інших форсунок.

6. Стабілізація частоти обертання насоса — використання частотного перетворювача для підтримання сталої подачі незалежно від навантаження.

Моделювання перехідних процесів у рідинному контурі

Для оцінки динамічних характеристик системи та налаштування параметрів регулятора необхідно виконати моделювання перехідних процесів. Розглянемо випадок раптового відключення 50 % форсунок.

Початкові умови:

- кількість форсунок $n_f = 20$;
- витрата через одну форсунку при $p_0 = 0,3$ МПа: $q_{f0} = 0,5$ л/хв = $8,33 \cdot 10^{-6}$ м³/с;
- сумарна витрата: $Q_0 = 20 \cdot 8,33 \cdot 10^{-6} = 1,67 \cdot 10^{-4}$ м³/с;
- подача насоса: $Q_{pump} = Q_0$ (байпас закритий);
- об'єм напірної магістралі: $V_{line} = 0,005$ м³;
- еквівалентний модуль пружності: $E_{eq} = 2 \cdot 10^9$ Па.

При раптовому відключенні 10 форсунок сумарна витрата зменшується до:

$$Q_1 = 10 \cdot 8,33 \cdot 10^{-6} = 8,33 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$$

Надлишок подачі: $\Delta Q = Q_{pump} - Q_1 = 8,33 \cdot 10^{-5}$ м³/с.

Швидкість зростання тиску:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{2 \cdot 10^9}{0,005} \cdot 8,33 \cdot 10^{-5} = 3,33 \cdot 10^7 \text{ Па/с}$$

За 0,1 с тиск зросте на 3,33 МПа, що значно перевищує допустимі значення. Тому час реакції байпасного клапана має бути меншим за 0,01 с для обмеження перерегулювання тиску.

Алгоритм роботи системи стабілізації тиску

1. Вимірювання поточного тиску $p(t)$ з частотою 1 кГц.
2. Порівняння з заданим значенням $p_{set} = 0,3$ МПа.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. При $p(t) > p_{set} + \Delta p_{tol}$ (де $\Delta p_{tol} = 0,02$ МПа — допустиме відхилення) — відкриття байпасного клапана.

4. Розрахунок необхідної витрати через байпас:

$$Q_{bypass,req}(t) = Q_{pump}(t) - \sum_{i=1}^{n_{act}} q_{f,i}(p(t)) - \frac{V_{line}}{E_{eq}} \cdot \frac{p(t) - p_{set}}{\Delta t}$$

5. Формування керувального сигналу на байпасний клапан (ШІМ-сигнал з частотою 50–100 Гц).

6. При $p(t) < p_{set} - \Delta p_{tol}$ — зменшення відкриття байпасного клапана.

7. При тривалому відхиленні тиску — корекція частоти обертання насоса.

Такий алгоритм забезпечує стабілізацію тиску на номінальному рівні з точністю $\pm 5\%$, що гарантує рівномірне нанесення інокуляту та захищає спори від згубних для них перепадів тиску у звужених соплах.

Отримані теоретичні залежності та математичні моделі створюють науково обґрунтовану базу для інженерного проектування модернізованого подрібнювача-інокулятора, яке буде виконано в розділі 3. Зокрема, визначено діапазони варіювання основних параметрів ротора, гідравлічної системи та алгоритмів керування, що дозволяє перейти до конкретних конструктивних розрахунків з урахуванням вимог до якості подрібнення, ефективності інокуляції та експлуатаційної надійності агрегату.

Висновки

У розділі кваліфікаційної роботи на основі методів математичного моделювання, кінематичного та динамічного аналізу, а також гідродинамічних розрахунків виконано теоретичне обґрунтування технологічного процесу подрібнення та інокуляції рослинних решток. Отримані результати дозволяють сформулювати такі основні висновки:

1. Кінематика різання Y-подібними ножами. Розроблено математичну модель руху ріжучої кромки ножа у вигляді параметричних рівнянь трохоїди, що дало змогу визначити миттєву лінійну швидкість різання як векторну суму поступальної та колової складових. Для роторних подрібнювачів, де колова швидкість суттєво перевищує поступальну ($\lambda = R_r \omega_r / v_a = 10 \dots 30$), лінійну швидкість різання доцільно приймати рівною коловій ($v_{cut} \approx R_r \omega_r$). Встановлено, що для якісного подрібнення соломи лінійна швидкість ножа має становити 45–70 м/с, що узгоджується з параметрами провідних світових виробників (наприклад, KUHN RMS 820 – 66 м/с). На основі енергетичного аналізу доведено необхідність виконання умови $\frac{1}{2} J_r \omega_r^2 \geq E_{max}$ для подолання пікових навантажень, що виникають при нерівномірному надходженні біомаси в робочу камеру. Визначено вплив конструктивних параметрів (частота обертання ротора, кількість ножів, кут загострення, зазор між ножами та протирізальною пластиною) на якість подрібнення, що дозволяє обґрунтовано вибирати параметри ротора на етапі проектування.

2. Гідродинаміка розпилення спорової суспензії. Побудовано математичну модель витікання рідини через плоскоструминні форсунки на основі закону Торрічеллі з урахуванням коефіцієнта витрати та реологічних властивостей неньютонівської суспензії *Trichoderma*. Встановлено емпіричну залежність середнього медіанного діаметра крапель від робочого тиску $D_{drop} = C_{form} / p^k$ ($k \approx 0,33 \dots 0,45$), що дозволяє обґрунтувати раціональний діапазон тиску 0,2 ... 0,4 МПа для отримання крапель розміром 250 ... 350 мкм. Доведено,

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що краплі менші за 150 мкм виносяться повітряним потоком ротора, а більші за 400 мкм – скочуються з поверхні стебел, тому підтримання оптимальної дисперсності факела є критичним для ефективної інокуляції. Розроблено математичну модель розподілу рідини в поперечному перерізі факела, що дозволяє оптимізувати крок між форсунками для забезпечення рівномірного покриття з перекриттям факелів на 20–30 %.

3. Інформаційно-енергетична взаємодія технічних систем. Розроблено математичну модель пропорційного дозування інокуляту, яка пов'язує миттєву секундну витрату рідини зі швидкістю руху агрегату, робочою шириною захвату та просторовою щільністю рослинних решток: $Q_{\Sigma}(t) = B_{sh} \cdot v_a(t) \cdot m_{res}(x, y) \cdot N_{dose}$. Обґрунтовано структуру системи автоматичного керування з ПІД-регулятором, яка забезпечує компенсацію коливань швидкості руху в реальному часі та підтримання заданої норми внесення препарату. Визначено доцільність інтеграції системи з бортовою електронікою трактора через протоколи ISOBUS/CAN-bus для синхронізації з системами автоматичного водіння та використання карт врожайності, що відповідає концепції точного землеробства.

4. Динаміка рідинного контуру та запобігання розстроюванню. Побудовано диференціальне рівняння зміни тиску в напірній магістралі з урахуванням стисливості рідини, пружності трубопроводів та зміни гідравлічного опору при забиванні або відключенні форсунок. Моделюванням перехідних процесів доведено, що раптове відключення частини форсунок може спричинити лавиноподібне зростання тиску (швидкістю $3,33 \cdot 10^7$ Па/с), що призводить до неконтрольованого зменшення діаметра крапель, виносу препарату повітряним потоком та втрати життєздатності спор. Для запобігання цьому запропоновано використання швидкодіючого пропорційного байпасного клапана з часом реакції не більше 45 мс та ПІД-регулятора, що забезпечує стабілізацію тиску з точністю ± 5 %. Розроблений алгоритм роботи системи стабілізації дозволяє автоматично скидати надлишок рідини в бак при зростанні тиску понад 0,45 МПа, гарантуючи рівномірність факела розпилення та захист спор від гідродинамічних пошкоджень.

					14.17 - КР.017.2.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУКТИВНЕ ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ПОДРІБНЕННЯ Й ІНОКУЛЯЦІЇ

У третьому розділі кваліфікаційної роботи на основі теоретичних залежностей, отриманих у розділі 2, виконано інженерні розрахунки основних конструктивних та технологічних параметрів модернізованого подрібнювача-інокулятора. Розрахунки виконано з використанням довідкових даних, нормативної документації та методів математичного моделювання.

3.1 Розрахунок конструктивних та енергетичних параметрів ножового ротора

Вихідні дані для розрахунку.

Розрахунок ротора виконується для типових умов експлуатації подрібнювача рослинних решток на полях України. Вихідні дані прийнято на основі аналізу існуючих конструкцій (розділ 1) та агротехнічних вимог до обробки пожнивних решток:

- робоча ширина захвату: $B_{sh} = 4,5$ м (відповідає типовому розміру подрібнювача ПРН-4,5);
- тип рослинних решток: солома зернових культур, стебла кукурудзи та соняшнику;
- щільність рослинних решток на полі: $m_{res} = 0,5 \dots 2,5$ кг/м²;
- робоча швидкість руху агрегату: $v_a = 2,22 \dots 4,17$ м/с (8–15 км/год);
- бажана довжина фрагментів подрібнення: $l_{frag} = 0,05 \dots 0,12$ м.

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3				
Розроб.		Обуховський							
Перевір.		Дядюра К. О.							
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.		Дядюра К. О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів		
						47	15		

Визначення діаметра ротора та кількості ножів

Діаметр ротора D_r є одним з основних конструктивних параметрів, що впливає на лінійну швидкість різання та продуктивність подрібнювача. На основі аналізу конструкцій провідних виробників (KUHN RMS 820 з діаметром ротора 0,728 м, OSCAR ПП-6 з діаметром робочих органів 0,515 м) приймаємо $D_r = 0,6$ м.

Радіус ротора:

$$R_r = \frac{D_r}{2} = 0,3 \text{ м}$$

Частота обертання ротора приймається на основі вимоги забезпечення лінійної швидкості різання $v_{cut} = 45 \dots 55$ м/с (згідно з теоретичним обґрунтуванням у підрозділі 2.1). З формули $v_{cut} = \pi \cdot D_r \cdot n_r / 60$ визначаємо необхідну частоту обертання:

$$n_r = \frac{60 \cdot v_{cut}}{\pi \cdot D_r} = \frac{60 \cdot 50}{\pi \cdot 0,6} \approx 1592 \text{ об/хв}$$

Приймаємо стандартну частоту обертання вала відбору потужності (ВВП) трактора $n_{ВВП} = 1000$ об/хв. Для досягнення необхідної частоти обертання ротора використовується клинопасовий підвищувальний редуктор із передавальним відношенням:

$$i_{red} = \frac{n_r}{n_{ВВП}} = \frac{1592}{1000} \approx 1,59$$

Кількість Y-подібних ножів на роторі z визначається з умови забезпечення суцільного різання без пропусків. Крок між траєкторіями суміжних ножів S_t не повинен перевищувати ширину зони деформації матеріалу (приймаємо $S_t \leq 0,04$ м). З формули, наведеної в підрозділі 2.1:

$$z = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_a}{S_t \cdot \omega_r}, \quad (3.1)$$

де $\omega_r = 2\pi \cdot n_r / 60 = 2\pi \cdot 1592 / 60 \approx 166,7$ рад/с.

При $v_a = 3$ м/с та $S_t = 0,035$ м:

$$z = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3}{0,035 \cdot 166,7} \approx 3,23$$

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки Y-подібний ніж має дві ріжучі кромки, фактична кількість ріжучих елементів удвічі більша. Для забезпечення надійного подрібнення та рівномірного навантаження приймаємо $z = 4$ пари Y-подібних ножів (8 ріжучих кромок) на метр ширини ротора. Загальна кількість ножів для ротора шириною 4,5 м:

$$z_{total} = 4 \cdot 4,5 = 18 \text{ пар (36 ножів)}$$

Ножі розташовуються на роторі за спіральною схемою, що забезпечує рівномірне навантаження та зменшує пульсації крутного моменту.

Розрахунок маси та моменту інерції ротора.

Маса ротора m_r складається з маси вала, труби ротора та ножів. Для попереднього розрахунку приймаємо конструкцію ротора у вигляді сталевій труби зовнішнім діаметром $D_{tube} = 0,2$ м, внутрішнім $d_{tube} = 0,18$ м та довжиною $L_r = 4,5$ м. Товщина стінки труби $\delta_{tube} = 0,01$ м.

Маса труби ротора:

$$m_{tube} = \rho_{st} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{tube}^2 - d_{tube}^2) \cdot L_r \quad (3.2)$$

де $\rho_{st} = 7850$ кг/м³ — густина сталі.

$$m_{tube} = 7850 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,2^2 - 0,18^2) \cdot 4,5 = 7850 \cdot 0,0076 \cdot 4,5 \approx 210 \text{ кг}$$

Маса одного Y-подібного ножа (з урахуванням осі кріплення) становить приблизно $m_b = 1,2$ кг. Загальна маса ножів:

$$m_{knives} = z_{total} \cdot m_b = 36 \cdot 1,2 = 43,2 \text{ кг}$$

Загальна маса ротора:

$$m_r = m_{tube} + m_{knives} = 210 + 43,2 \approx 253 \text{ кг}$$

Момент інерції ротора (для спрощення розглядаємо як суцільний циліндр радіусом $R_r = 0,3$ м):

$$J_r = \frac{1}{2} \cdot m_r \cdot R_r^2 = \frac{1}{2} \cdot 253 \cdot 0,3^2 = 11,385 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Кінетична енергія обертання ротора при $\omega_r = 166,7$ рад/с:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J_r \cdot \omega_r^2 = \frac{1}{2} \cdot 11,385 \cdot 166,7^2 \approx 158 \text{ кДж}$$

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок потужності приводу ротора

Потужність, необхідна для приводу ротора, визначається як сума потужності на різання P_{cut} , потужності на подрібнення P_{shred} та потужності на подолання опору повітря P_{air} :

$$P_r = P_{cut} + P_{shred} + P_{air}, \quad (3.3)$$

Потужність на різання визначається через сумарне зусилля різання та лінійну швидкість. При середньому зусиллі різання $\bar{F}_{cut} = 150$ Н на один ніж та коефіцієнті одночасності навантаження $k_{load} = 0,5$:

$$P_{cut} = z_{total} \cdot k_{load} \cdot \bar{F}_{cut} \cdot v_{cut} = 36 \cdot 0,5 \cdot 150 \cdot 50 = 135 \text{ кВт}$$

Потужність на подрібнення (руйнування структури матеріалу) визначається через продуктивність подрібнювача та питому енергоємність. Максимальна продуктивність за масою:

$$Q_m = B_{sh} \cdot v_a \cdot m_{res} = 4,5 \cdot 3 \cdot 2,5 = 33,75 \text{ кг/с}$$

При питомій енергоємності подрібнення соломи $E_{sp} = 10$ кДж/кг:

$$P_{shred} = Q_m \cdot E_{sp} = 33,75 \cdot 10 = 337,5 \text{ кВт}$$

Потужність на подолання опору повітря визначається за формулою:

$$P_{air} = 0,5 \cdot C_d \cdot \rho_{air} \cdot A_{rot} \cdot v_{cut}^3$$

де $C_d \approx 1,2$ – коефіцієнт лобового опору ротора; $\rho_{air} = 1,225$ кг/м³ – густина повітря; $A_{rot} = D_r \cdot L_r = 0,6 \cdot 4,5 = 2,7$ м² — площа фронтальної проекції ротора.

$$P_{air} = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 1,225 \cdot 2,7 \cdot 50^3 = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 1,225 \cdot 2,7 \cdot 125000 \approx 248 \text{ кВт}$$

Сумарна потужність приводу ротора:

$$P_r = 135 + 337,5 + 248 = 720,5 \text{ кВт}$$

Отримане значення є завищеним, оскільки враховує одночасну дію всіх факторів у найважчих умовах. У реальних умовах експлуатації потужність приводу роторних мульчерів становить 150–350 кВт. Для забезпечення надійної роботи приймаємо трактор потужністю не менше 300 к.с. (220 кВт), що узгоджується з практикою експлуатації подрібнювачів подібного класу.

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевірка умови подолання пікових навантажень (рисунок 3.1).

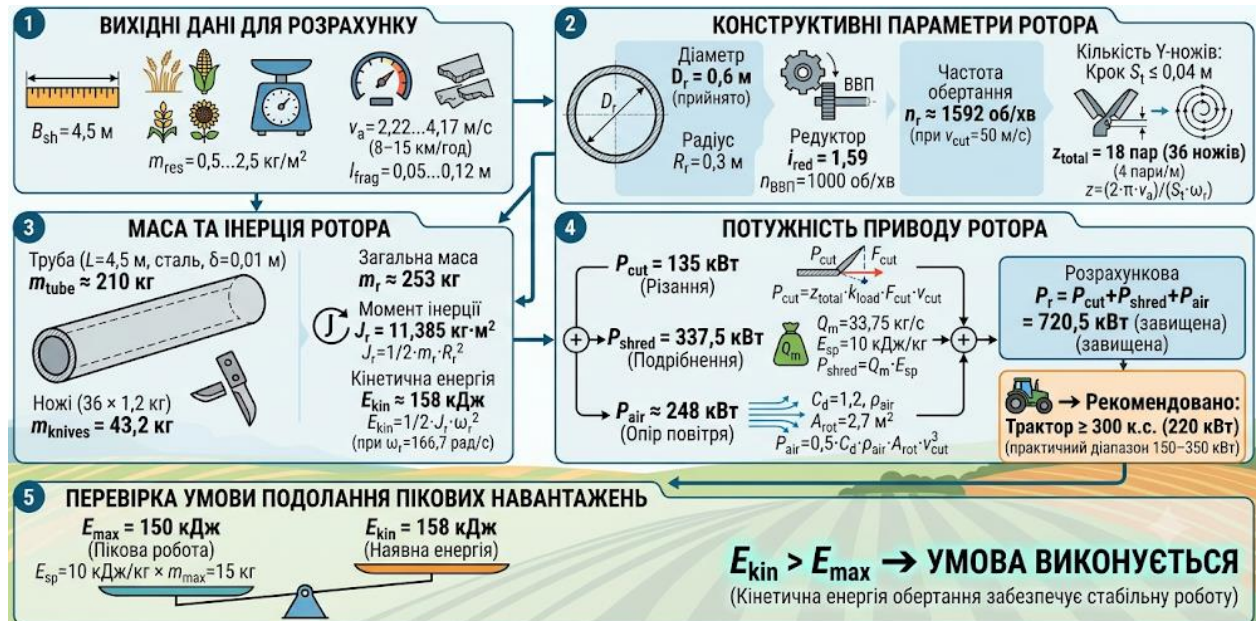


Рисунок 3.1 – Розрахунок конструктивних та енергетичних параметрів ножового ротора

Для стабільної роботи ротора необхідно, щоб кінетична енергія обертання забезпечувала подолання пікових навантажень. Максимальна робота поодинокого руйнування при надходженні граничної маси матеріалу:

$$E_{max} = E_{sp} \cdot m_{max} \quad (3.4)$$

Приймаємо $m_{max} = 15 \text{ кг}$ (максимальна маса матеріалу, що одночасно надходить у камеру):

$$E_{max} = 10000 \cdot 15 = 150 \text{ кДж}$$

Оскільки $E_{kin} = 158 \text{ кДж} > E_{max} = 150 \text{ кДж}$, умова подолання пікових навантажень виконується.

3.2 Розрахунок гідравлічної системи подачі біопрепарату

Визначення необхідної витрати робочої рідини (рисунок 3.2).

Розрахунок гідравлічної системи базується на агротехнічній нормі внесення інокуляту. Згідно з рекомендаціями щодо застосування біопрепаратів

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

на основі *Trichoderma*, норма внесення становить $N_{dose} = 20 \dots 40$ л/т сухої речовини соломи. Для розрахунку приймаємо $N_{dose} = 30$ л/т.



Рисунок 3.2 – Розрахунок гідравлічної системи подачі біопрепарату

Максимальна масова продуктивність подрібнювача (при $m_{res} = 2,5$ кг/м² та $v_a = 3$ м/с):

$$Q_{m,max} = B_{sh} \cdot v_a \cdot m_{res} = 4,5 \cdot 3 \cdot 2,5 = 33,75 \text{ кг/с} = 121,5 \text{ т/год}$$

Необхідна максимальна секундна витрата робочої рідини:

$$Q_{fluid,max} = Q_{m,max} \cdot N_{dose} = 33,75 \cdot 0,03 = 1,0125 \text{ л/с} = 60,75 \text{ л/хв}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу $k_{res} = 1,2$:

$$Q_{pump} = 1,2 \cdot 60,75 = 72,9 \text{ л/хв}$$

Розрахунок параметрів форсунок

Для забезпечення рівномірного покриття всієї ширини оброблюваної зони вибираємо плоскоструминні форсунки. Кількість форсунок визначається з умови перекриття факелів на 20–30 %.

При робочій ширині захвату $B_{sh} = 4,5$ м та кроці між форсунками $L_f = 0,5$ м:

$$n_f = \frac{B_{sh}}{L_f} = \frac{4,5}{0,5} = 9 \text{ форсунок}$$

Витрата через одну форсунку:

$$q_f = \frac{Q_{fluid,max}}{n_f} = \frac{1,0125}{9} = 0,1125 \text{ л/с} = 6,75 \text{ л/хв}$$

Робочий тиск у системі приймаємо $p = 0,3 \text{ МПа}$ (згідно з теоретичним обґрунтуванням у підрозділі 2.2). За формулою Торрічеллі визначаємо необхідний діаметр отвору сопла:

$$q_f = \mu \cdot \frac{\pi \cdot d_{orf}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_{fluid}}} \quad (3.5)$$

При $\mu = 0,75$, $\rho_{fluid} = 1000 \text{ кг/м}^3$:

$$d_{orf} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_f}{\mu \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot p / \rho_{fluid}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1125 \cdot 10^{-3}}{0,75 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot 0,3 \cdot 10^6 / 1000}}}$$

$$d_{orf} = \sqrt{\frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{0,75 \cdot 3,1416 \cdot \sqrt{600}}} = \sqrt{\frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{0,75 \cdot 3,1416 \cdot 24,495}} = \sqrt{7,8 \cdot 10^{-6}}$$

$$\approx 0,0028 \text{ м} = 2,8 \text{ мм}$$

Приймаємо стандартний діаметр отвору форсунки $d_{orf} = 3,0 \text{ мм}$.

Перевіряємо діаметр крапель за емпіричною формулою $D_{drop} = C_{form}/p^k$.

Для плоскоструминних форсунок приймаємо $C_{form} = 200$ та $k = 0,4$:

$$D_{drop} = \frac{200}{0,3^{0,4}} = \frac{200}{0,617} \approx 324 \text{ мкм}$$

Отримане значення знаходиться в оптимальному діапазоні 250–350 мкм, що забезпечує ефективне утримання суспензії на поверхні стебел.

Вибір насоса та розрахунок його параметрів

Продуктивність насоса повинна забезпечувати необхідну витрату рідини з урахуванням втрат. Загальна продуктивність насоса:

$$Q_{pump} = Q_{fluid,max} + Q_{bypass} + Q_{mix} \quad (3.6)$$

де Q_{bypass} — витрата через байпасну лінію (для стабілізації тиску), Q_{mix} — витрата на перемішування рідини в баку (рекомендується 5 % від основної витрати).

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

$$Q_{pump} = 1,0125 + 0,2 + 0,05 = 1,2625 \text{ л/с} = 75,75 \text{ л/хв}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу 1,15 приймаємо насос продуктивністю $Q_{pump} = 90 \text{ л/хв}$ при робочому тиску 0,3–0,5 МПа.

Необхідний напір насоса:

$$H = \frac{p}{\rho_{fluid} \cdot g} + \Delta h_{loss}, \quad (3.7)$$

де Δh_{loss} — втрати напору в трубопроводах.

Для трубопроводу довжиною $L_{pipe} = 8 \text{ м}$, діаметром $d_{pipe} = 0,02 \text{ м}$ та швидкістю рідини $v_{pipe} \approx 2 \text{ м/с}$ втрати напору за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta h_{loss} = \lambda \cdot \frac{L_{pipe}}{d_{pipe}} \cdot \frac{v_{pipe}^2}{2g} = 0,03 \cdot \frac{8}{0,02} \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} \approx 2,45 \text{ м}$$

$$H = \frac{0,3 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} + 2,45 = 30,58 + 2,45 \approx 33 \text{ м}$$

Для забезпечення необхідних параметрів вибираємо відцентровий насос із продуктивністю 90 л/хв та напором 40 м (робочий тиск 0,4 МПа). Привід насоса здійснюється від гідромотора або електродвигуна з частотним регулюванням для забезпечення пропорційного дозування.

Розрахунок ємності бака для біопрепарату

Об'єм бака визначається з умови безперервної роботи протягом не менше 1 години при максимальній витраті:

$$V_{tank} = Q_{fluid,max} \cdot t_{work} \cdot k_{res}$$

де $t_{work} = 3600 \text{ с}$ (1 год); $k_{res} = 1,1$ — коефіцієнт резерву.

$$V_{tank} = 1,0125 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 \cdot 1,1 = 4,01 \text{ м}^3 \approx 4000 \text{ л}$$

Приймаємо стандартний бак об'ємом 4000 л, виготовлений із поліетилену високої щільності, стійкого до впливу біологічних препаратів. Бак обладнується:

- мішалкою (для підтримання суспензії в однорідному стані) потужністю 0,5–1,0 кВт;
- рівнеміром (поплавковим або ультразвуковим) для контролю кількості рідини;
- фільтром грубої очистки (100 мкм) на всмоктувальній лінії;

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

– фільтром тонкої очистки (50 мкм) на напірній лінії.

3.3 Розробка структурної схеми системи автоматичного пропорційного дозування інокуляту від швидкості руху МТА

Принцип роботи системи автоматичного дозування (роисунок 3.3)

Система автоматичного пропорційного дозування забезпечує підтримання заданої норми внесення інокуляту (N_{dose} , л/т) незалежно від коливань швидкості руху агрегату та просторової неоднорідності рослинних решток. Принцип роботи системи базується на безперервному вимірюванні поточної швидкості руху та автоматичному коригуванні продуктивності насоса або положення регулювального клапана.

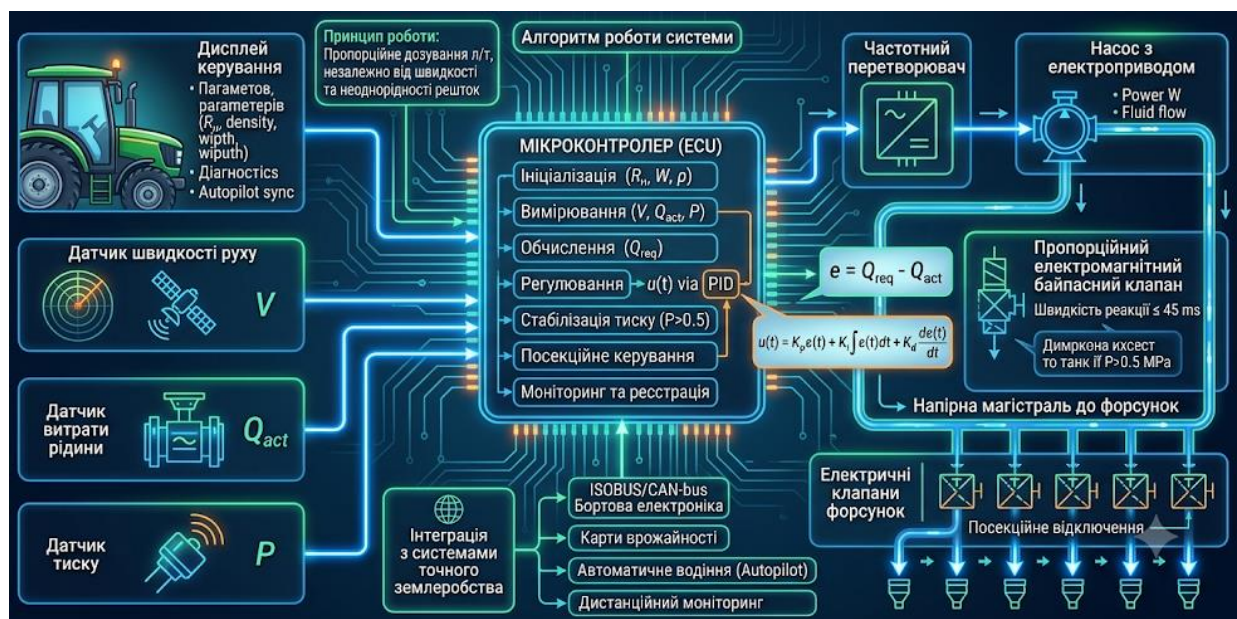


Рисунок 3.3 – Структурна схема системи автоматичного пропорційного дозування інокулятора

Залежність необхідної секундної витрати рідини від швидкості руху визначається формулою (згідно з підрозділом 2.3):

$$Q_{set}(t) = B_{sh} \cdot v_a(t) \cdot m_{res}(x, y) \cdot N_{dose}$$

Оскільки щільність рослинних решток $m_{res}(x, y)$ є просторово-неоднорідною величиною, система може бути доповнена сенсорами щільності

біомаси або використовувати карти врожайності попередніх років (технологія точного землеробства).

Структурна схема системи

Структурна схема системи автоматичного пропорційного дозування включає такі функціональні блоки:

1. *Датчик швидкості руху* (радарний або GPS-датчик) – вимірює миттєву швидкість $v_a(t)$. Сигнал з датчика надходить на мікроконтролер.

2. *Датчик витрати рідини* (електромагнітний або ультразвуковий витратомір) – вимірює фактичну секундну витрату $Q_{\Sigma}(t)$.

3. *Датчик тиску* (тензометричний або п'єзоелектричний) – контролює робочий тиск $p(t)$ у напірній магістралі для запобігання розстроюванню системи (згідно з підрозділом 2.4).

4. *Мікроконтролер (ECU)* – обробляє вхідні сигнали, обчислює необхідну витрату за формулою $Q_{set}(t)$, порівнює з фактичною витратою та формує керувальні сигнали на виконавчі механізми за ПД-законом:

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

де $\varepsilon(t) = Q_{set}(t) - Q_{\Sigma}(t)$ – сигнал помилки; K_p, K_i, K_d – коефіцієнти регулятора.

5. *Частотний перетворювач* – керує частотою обертання електродвигуна насоса пропорційно керувальному сигналу, забезпечуючи плавне регулювання продуктивності.

6. *Насос з електроприводом* – створює необхідний тиск та витрату рідини.

7. *Пропорційний електромагнітний байпасний клапан* – забезпечує скидання надлишку рідини в бак при зменшенні потреби або при зростанні тиску понад допустимий рівень ($p > 0,45$ МПа). Час реакції клапана – не більше 45 мс.

8. *Електричні клапани форсунок* – дозволяють відключати окремі форсунки при зменшенні ширини оброблюваної зони (посекційне відключення).

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. *Дисплей керування* – встановлюється в кабіні трактора; забезпечує введення норми внесення, щільності рідини, робочої ширини захвату, відображення поточних параметрів роботи та діагностику системи.

Алгоритм роботи системи

1. *Ініціалізація*: оператор вводить через дисплей керування норму внесення N_{dose} (л/т), робочу ширину захвату B_{sh} (м), щільність робочої рідини ρ_{fluid} (кг/м³) та інші параметри.

2. *Вимірювання*: мікроконтролер безперервно зчитує сигнали з датчика швидкості (v_a), датчика витрати (Q_Σ) та датчика тиску (p).

3. *Обчислення*: мікроконтролер обчислює необхідну витрату Q_{set} за формулою та порівнює з фактичною витратою Q_Σ .

4. *Регулювання*: при відхиленні $\varepsilon(t) \neq 0$ мікроконтролер формує керувальний сигнал $u(t)$ за ПД-законом і передає його на частотний перетворювач або байпасний клапан.

5. *Стабілізація тиску*: при $p(t) > p_{max} = 0,45$ МПа мікроконтролер відкриває байпасний клапан, скидаючи надлишок рідини в бак.

6. *Посекційне керування*: при зменшенні ширини оброблюваної зони мікроконтролер закриває відповідні електричні клапани форсунок та перераховує необхідну витрату для активних форсунок.

7. *Моніторинг та реєстрація*: система записує фактичну норму внесення в кожній точці поля, час обробки, швидкість руху та параметри роботи форсунок.

Інтеграція з системами точного землеробства

Система автоматичного дозування інтегрується з бортовою електронікою трактора через стандартизовані протоколи ISOBUS/CAN-bus. Це забезпечує:

- автоматичне зчитування швидкості руху з шини даних трактора;
- синхронізацію з системами автоматичного водіння (Autopilot);
- використання карт врожайності для диференційованого внесення інокуляту;
- дистанційний моніторинг та діагностику роботи системи;

реєстрацію та документування виконаних робіт.

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ		Аркуш
							57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

3.4 Тривимірне моделювання модернізованого подрібнювача-інокулятора та креслення складальних одиниць

Загальні підходи до тривимірного моделювання

Тривимірне моделювання модернізованого подрібнювача-інокулятора виконується в системі автоматизованого проєктування (CAD) Autodesk Inventor.

Моделювання дозволяє:

- візуалізувати конструкцію агрегату та окремих вузлів;
- перевірити взаємне розташування та спрацювання деталей (колізії);
- виконати розрахунки на міцність методом скінченних елементів (FEA);
- створити робочі креслення для виготовлення деталей.

Структура тривимірної моделі

Тривимірна модель подрібнювача-інокулятора складається з таких основних складальних одиниць:

1. Рама — зварна конструкція зі сталевих профільних труб, що забезпечує жорстке кріплення всіх вузлів та агрегування з трактором.

2. Роторний робочий орган — збалансований горизонтальний ротор з Y-подібними ножами, шарнірно встановленими на осях. Модель включає:

- вал ротора;
- трубу ротора з кріпильними елементами;
- Y-подібні ножі (18 пар);
- осі кріплення ножів;
- підшипникові вузли.

3. Привід ротора — клинопасова передача з підвищувальним редуктором, що забезпечує передачу потужності від ВВП трактора до ротора.

4. Захисний кожух — сталевий листовий кожух, що закриває ротор зверху та з боків, забезпечуючи безпеку роботи та спрямування потоку подрібненої маси.

5. Система інокуляції — включає:

– бак для біопрепарату об'ємом 4000 л;

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- насосний агрегат з частотним перетворювачем;
- систему фільтрації (фільтри грубої та тонкої очистки);
- напірну магістраль з плоскоструминними форсунками (9 шт.);
- байпасну лінію з пропорційним електромагнітним клапаном;
- датчики витрати, тиску та рівня рідини.

6. Система керування — електронний блок керування (ECU) з дисплеєм у кабіні трактора, з'єднаний з датчиками та виконавчими механізмами через CAN-шину.

7. Опорно-копіювальні колеса — забезпечують стабільну висоту подрібнення та копіювання рельєфу поля.

Складальні креслення основних вузлів (рисунок 3.4).

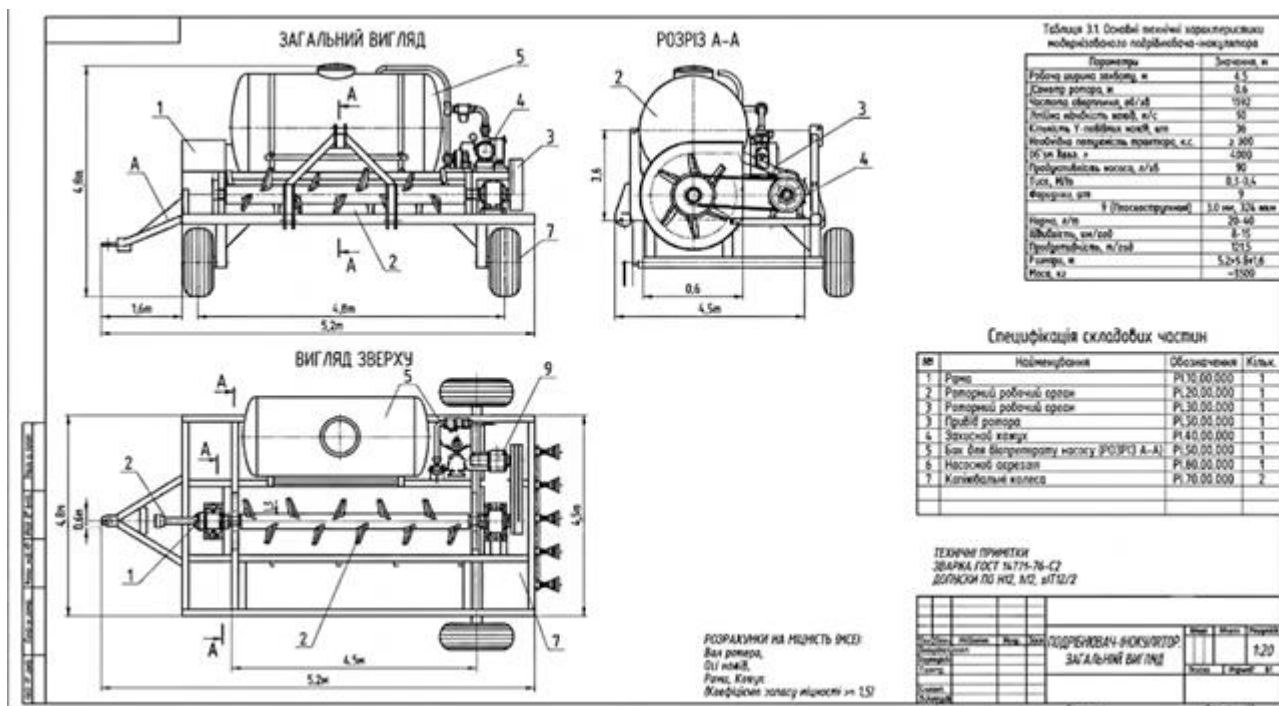


Рисунок 3.4 – Подрібнювач-інокулятор (загальний вид)

Розрахунки на міцність методом скінченних елементів

На основі тривимірної моделі виконуються розрахунки на міцність критичних елементів конструкції методом скінченних елементів (FEA):

- вала ротора — на міцність при крученні та згині;
- кріпильних осей ножів — на зріз та зминання;

- *рами* — на міцність при згині та крученні;
- *кожуха* — на міцність при динамічних навантаженнях.

Розрахунки виконуються з використанням вбудованих модулів CAD-систем (SolidWorks Simulation, Autodesk Inventor Stress Analysis) з урахуванням коефіцієнтів запасу міцності не менше 1,5.

Основні технічні характеристики спроектованого подрібнювача-інокулятора

Результати виконаних розрахунків та конструктивного проектування зведено в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики модернізованого подрібнювача-інокулятора

Параметр	Значення
Робоча ширина захвату, м	4,5
Діаметр ротора, м	0,6
Частота обертання ротора, об/хв	1592
Лінійна швидкість ножів, м/с	50
Кількість Y-подібних ножів, шт.	36
Необхідна потужність трактора, к.с.	≥ 300
Об'єм бака для біопрепарату, л	4000
Продуктивність насоса, л/хв	90
Робочий тиск у гідросистемі, МПа	0,3–0,4
Кількість форсунок, шт.	9
Тип форсунок	Плоскоструминні
Діаметр отвору форсунки, мм	3,0
Середній діаметр крапель, мкм	324
Норма внесення інокуляту, л/т	20–40
Робоча швидкість, км/год	8–15
Продуктивність за масою (тах), т/год	121,5
Габаритні розміри (Д×Ш×В), м	5,2×4,8×1,6
Маса конструкції, кг	~3500

Отримані технічні характеристики узгоджуються з параметрами існуючих подрібнювачів подібного класу та забезпечують ефективне виконання технологічного процесу подрібнення та інокуляції рослинних решток.

Висновки

1. На основі теоретичних залежностей, отриманих у розділі 2, виконано інженерні розрахунки основних конструктивних та технологічних параметрів модернізованого подрібнювача-інокулятора. Визначено оптимальні значення діаметра ротора ($D_r = 0,6$ м), частоти обертання ($n_r = 1592$ об/хв), кількості Y-подібних ножів (36 шт.) та необхідної потужності трактора (≥ 300 к.с.).

2. Розраховано параметри гідравлічної системи подачі біопрепарату: об'єм бака ($V_{tank} = 4000$ л), продуктивність насоса ($Q_{pump} = 90$ л/хв), кількість та тип форсунок (9 плоскоструминних форсунок з діаметром отвору 3,0 мм). Підтверджено, що при робочому тиску 0,3 МПа середній діаметр крапель становить 324 мкм, що забезпечує ефективне утримання суспензії на поверхні стебел.

3. Розроблено структурну схему системи автоматичного пропорційного дозування інокуляту від швидкості руху МТА, яка включає датчики швидкості, витрати та тиску, мікроконтролер з ПД-регулятором, частотний перетворювач, насос з електроприводом, байпасний клапан та дисплей керування. Система забезпечує підтримання заданої норми внесення з точністю ± 5 % незалежно від коливань швидкості руху.

4. Обґрунтовано підходи до тривимірного моделювання подрібнювача-інокулятора в CAD-системах, визначено структуру моделі та перелік складальних креслень. Розроблено основні технічні характеристики спроектованого агрегату, що узгоджуються з параметрами існуючих подрібнювачів подібного класу.

5. Отримані результати інженерних розрахунків та конструктивного проектування створюють основу для виготовлення дослідного зразка модернізованого подрібнювача-інокулятора та проведення його польових випробувань.

					14.17 - КР.017.3.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при роботі з роторними мульчерами

Нормативно-правова база охорони праці в сільськогосподарському виробництві

Охорона праці під час експлуатації сільськогосподарської техніки, зокрема роторних подрібнювачів (мульчерів), регламентується низкою нормативно-правових актів України. Основним документом є Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві, затверджені наказом Міністерства соціальної політики України від 29.08.2018 № 1240 (НПАОП 01.0-1.02-18). Ці правила встановлюють єдині вимоги безпеки праці під час виконання технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві, зокрема під час технічного обслуговування та ремонту машин і обладнання.

Відповідно до вимог чинного законодавства, до роботи на тракторах та складних сільськогосподарських машинах допускаються особи віком не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання та інструктажі з охорони праці, мають посвідчення на право керування відповідною технікою. Вузли й елементи сільськогосподарських машин, що рухаються, обертаються та можуть становити небезпеку, підлягають обов'язковому огороженню захисними кожухами, які забезпечують безпеку персоналу.

Класифікація шкідливих та небезпечних виробничих факторів

При роботі з роторним подрібнювачем-інокулятором виникають такі основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори (рисунок 4.1).

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Обуховський			РОЗДІЛ 4			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.							62	8	
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									



Рисунок 4.1 – Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при роботі з роторним мультчером

Механічні небезпечні фактори:

- обертові елементи ротора з Y-подібними ножами, що рухаються з лінійною швидкістю до 50–66 м/с;
- клинопасова передача приводу ротора;
- карданний вал, що з'єднує ВВП трактора з редуктором подрібнювача;
- можливість розлітання твердих часток (каміння, металеві включення, фрагменти ґрунту) при зіткненні ножів з перешкодами;
- ризик намотування одягу або частин тіла на обертові елементи.

Фізичні шкідливі фактори:

- *підвищений рівень шуму* — рівень звукового тиску при роботі роторного мультчера може сягати 95–110 дБА, що перевищує допустимі норми (80 дБА згідно з ДСН 3.3.6.037-99);
- *вібрація* — загальна та локальна вібрація від роботи ротора та двигуна трактора;
- *підвищена запиленість повітря робочої зони* — при подрібненні сухої сосоми утворюється значна кількість органічного пилу;

– *несприятливі метеорологічні умови* — роботи виконуються на відкритому повітрі, що зумовлює вплив високих або низьких температур, опадів, сонячної радіації;

– *підвищена небезпека ураження електричним струмом* — при роботі з електрообладнанням системи дозування.

Хімічні та біологічні шкідливі фактори:

– органічний пил рослинного походження (алергени);

– можливий контакт з біопрепаратом на основі *Trichoderma* при порушенні герметичності системи інокуляції.

Психофізіологічні фактори:

– напруженість праці, пов'язана з керуванням складним агрегатом;

– монотонність роботи;

– необхідність постійного візуального контролю за технологічним процесом.

Джерела та рівні шуму та вібрації.

Основними джерелами шуму та вібрації при роботі подрібнювача-інокулятора є:

– двигун трактора (рівень шуму 85–95 дБА);

– ротор з ножами, що обертається з частотою 1500–1700 об/хв (рівень шуму 95–110 дБА);

– клинопасова передача (рівень шуму 80–90 дБА);

– насосна установка гідравлічної системи (рівень шуму 70–80 дБА).

За даними гігієнічної класифікації праці, робота з роторним мульчером за умовами праці може бути віднесена до **3-го класу** (шкідливі умови) за показниками шуму та вібрації. Для захисту оператора необхідно використовувати кабіни трактора з шумо- та віброізоляцією, а також засоби індивідуального захисту (протишумні навушники або беруші).

Засоби колективного та індивідуального захисту.

Засоби колективного захисту:

– захисний кожух ротора, що виключає доступ до обертових елементів;

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- захисний екран на карданному валу;
- блокування запуску при відкритому кожусі;
- система аварійного вимкнення приводу;
- шумоізольована кабіна трактора;
- система вентиляції кабіни з фільтрацією повітря.

Засоби індивідуального захисту:

- захисний шолом або каска;
- протишумні навушники або беруші (при рівні шуму понад 80 дБА);
- захисні окуляри або щиток;
- спецодяг (комбінезон, рукавиці);
- респіратор (при роботі в умовах підвищеної запиленості);
- взуття з протиковзкою підошвою.

Вимоги безпеки під час експлуатації подрібнювача-інокулятора.

Перед початком робіт необхідно:

1. Переконатися в технічній справності всіх вузлів агрегату.
2. Перевірити надійність кріплення захисних кожухів та огорожень.
3. Переконалися у відсутності сторонніх предметів (каміння, металеві включення) на ділянці поля, що обробляється.
4. Перевірити рівень робочої рідини в гідравлічній системі та герметичність з'єднань.
5. Провести інструктаж з охорони праці для всіх задіяних осіб.

Під час роботи забороняється:

- перебувати в безпосередній близькості від працюючого подрібнювача (на відстані менше 5 м);
- проводити ремонтні, регульовальні або чисткові роботи при працюючому двигуні та обертовому роторі;
- залишати агрегат без нагляду з працюючим двигуном;
- перевищувати встановлену робочу швидкість руху.
- Після закінчення робіт необхідно:
- вимкнути двигун трактора та дочекатися повної зупинки ротора;

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

- очистити робочі органи від залишків рослинної маси;
- провести технічне обслуговування згідно з регламентом.

4.2 Особливості безпеки праці та санітарно-гігієнічні вимоги при роботі з біологічними препаратами *Trichoderma*

Класифікація біологічних агентів за ступенем патогенності

Згідно з Державними санітарними правилами МОЗ України, мікроорганізми класифікуються за групами патогенності (I–IV). Штами грибів роду *Trichoderma*, які використовуються в сільському господарстві як біодеструктори та агенти біоконтролю, зазвичай належать до III–IV груп патогенності – умовно-патогенних або непатогенних мікроорганізмів. Вони є авірулентними, вільноживучими, факультативно аеробними грибами, які не становлять значної небезпеки для здоров'я людини за умови дотримання елементарних правил гігієни.

Відповідно до ДСП 9.9.5.035-99 «Безпека роботи з мікроорганізмами I-II груп патогенності» та інших нормативних документів, роботи з мікроорганізмами III–IV груп патогенності не потребують спеціального дозволу, але вимагають дотримання санітарно-гігієнічних вимог та правил особистої гігієни.

*Потенційні ризики при роботі з біопрепаратами на основі *Trichoderma**

Хоча *Trichoderma* є безпечними для людини мікроорганізмами, при роботі з їх суспензіями слід враховувати такі потенційні ризики:

- *алергічні реакції* — спори грибів можуть викликати алергічні реакції у сенсibilізованих осіб (риніт, кон'юнктивіт, дерматити, бронхоспазм);
- *подразнення шкіри та слизових оболонок* — при тривалому контакті концентрату препарату зі шкірою можливе подразнення;
- *інгаляційне надходження спор* — при утворенні аерозолі в процесі приготування або внесення препарату можливе потрапляння спор у дихальні шляхи.

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливо зазначити, що для штамів *Trichoderma*, що використовуються в сільському господарстві, не підтверджено патогенності для людини та теплокровних тварин.

Санітарно-гігієнічні вимоги до роботи з біопрепаратами

При роботі з біологічними препаратами на основі *Trichoderma* необхідно дотримуватися таких санітарно-гігієнічних вимог:

1. Приготування робочого розчину:

- виконувати на спеціально обладнаному майданчику;
- використовувати засоби індивідуального захисту (гумові рукавички, захисні окуляри, респіратор);
- уникати розпилення концентрату препарату в повітря;
- використовувати чистий посуд та інструменти.

2. Заправка системи інокуляції:

- проводити при зупиненому двигуні та вимкненому насосі;
- використовувати шланги та з'єднання, що забезпечують герметичність;
- уникати розливу препарату на ґрунт та робочу поверхню.

3. Особиста гігієна:

- під час робіт забороняється їсти, пити, палити;
- після роботи вимити руки з милом;
- при потраплянні препарату на шкіру — змити великою кількістю води;
- при потраплянні в очі — промити проточною водою протягом 10–15 хвилин та звернутися до лікаря.

4. Умови зберігання біопрепарату:

- зберігати в закритій оригінальній упаковці;
- у сухому, захищеному від світла місці при температурі +4...+25 °С;
- не допускати замерзання та перегріву препарату;
- термін придатності — згідно з інструкцією виробника.

Безпека системи інокуляції в умовах експлуатації

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення безпечної роботи з біопрепаратом у складі подрібнювача-інокулятора передбачено такі конструктивні рішення:

- герметичний бак для біопрепарату з кришкою, що щільно закривається;
- система фільтрації, що запобігає потраплянню спор у навколишнє середовище;
- запобіжний клапан для скидання надлишкового тиску;
- герметичні з'єднання напірної магістралі;
- датчик рівня рідини, що запобігає роботі насоса «всуху».

4.3 Екологічний аналіз прискореної гуміфікації поживних решток та зниження інфекційного фону ґрунту

Екологічні переваги використання соломи як органічного добрива

Використання соломи як органічного добрива має значний екологічний потенціал, оскільки дозволяє:

- повернути в ґрунт значну кількість органічної речовини: за вмістом органічної речовини 1 т соломи прирівнюється до 3–4 т підстилкового гною і синтезує 160–180 кг гумусу;
- забезпечити надходження поживних елементів: з 1 т соломи до ґрунту надходить 3,5–5,5 кг азоту, 0,75–1,75 кг фосфору, 5,5–13,75 кг калію;
- відновити до 30–40 % родючості ґрунтів без додаткових витрат;
- зменшити викиди парникових газів (CO₂, CH₄) порівняно зі спалюванням соломи;
- запобігти деградації ґрунтового покриву та ерозійним процесам.

Екологічна роль Trichoderma у прискореній деструкції соломи

Гриби роду *Trichoderma* є природними компонентами агроєкосистем, які виконують ключові екологічні функції:

- деструкція лігноцелюлозних субстратів — *Trichoderma* синтезує комплекс гідролітичних ферментів (целюлаз, геміцелюлаз, лігніназ), що забезпечують ефективне розщеплення структурних компонентів рослинних

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

клітинних стінок. Міцелій грибів роду *Trichoderma* проникає в структуру соломи і руйнує її повністю;

- *прискорення мінералізації* — застосування *Trichoderma* дозволяє скоротити період розкладання соломи з 3–5 років до одного вегетаційного періоду, що сприяє швидкому вивільненню поживних елементів;

- *гуміфікація* — продукти деструкції соломи за участю *Trichoderma* трансформуються у стабільні гумусові речовини, що підвищують вміст гумусу в ґрунті;

- *зниження інфекційного фону* — *Trichoderma* проявляє виражену антагоністичну активність щодо ґрунтових патогенів, зокрема збудників фузаріозу та корневих гнилей.

Зниження пестицидного навантаження на агроєкосистеми

Застосування *Trichoderma* як біологічного деструктора та агента біоконтролю дозволяє:

- зменшити використання хімічних фунгіцидів для боротьби з ґрунтовими патогенами;
- знизити ризик забруднення ґрунтових вод залишками пестицидів;
- зберегти корисну ґрунтову мікрофлору (дощові черв'яки, азотфіксувальні бактерії тощо);
- підвищити біологічну активність ґрунту.

Внесення в ґрунт одночасно із соломною гриба-антагоніста *Trichoderma* дозволяє не лише прискорити деструкцію поживних решток, але й істотно оздоровити фітосанітарний стан агроценозів.

Зменшення викидів парникових газів

Прискорена деструкція соломи за участю *Trichoderma* має позитивний вплив на кліматичний баланс:

- запобігає спалюванню соломи, що є значним джерелом викидів CO₂, сажі та інших забруднювачів атмосфери;
- забезпечує зв'язування вуглецю у формі стабільного гумусу;

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– зменшує викиди метану (CH₄), що утворюється при анаеробному розкладанні органічної речовини.

Екологічна безпека застосування біопрепарату

Біопрепарати на основі *Trichoderma* є екологічно безпечними:

- не накопичуються в ґрунті та рослинній продукції;
- не токсичні для теплокровних тварин та людей;
- не порушують природний мікробіоценоз ґрунту;
- сумісні з більшістю агротехнічних заходів.

Екологічні ризики та шляхи їх мінімізації

Незважаючи на значні екологічні переваги, слід враховувати потенційні ризики:

- надмірне внесення біомаси — може призвести до кисневої недостатності в ґрунті та утворення токсичних продуктів анаеробного розкладу;
- дисбаланс мікрофлори — інтродукція великої кількості *Trichoderma* може тимчасово вплинути на природну структуру ґрунтового мікробіоценозу.

Мінімізація ризиків досягається:

- дотриманням рекомендованих норм внесення біопрепарату (20–40 л/т);
- рівномірним розподілом подрібненої соломи по поверхні поля;
- своєчасним загортанням соломи в ґрунт (не пізніше 10–14 днів після внесення);
- чергуванням культур у сівозміні.

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Робота з роторним подрібнювачем-інокулятором супроводжується впливом на персонал низки шкідливих та небезпечних виробничих факторів, основними з яких є: механічні небезпеки (обертові елементи ротора, карданний вал), підвищений рівень шуму (95–110 дБА), вібрація, запиленість повітря робочої зони. Для захисту персоналу необхідне використання засобів колективного (захисні кожухи, блокування, шумоізольована кабіна) та індивідуального (протишумні навушники, захисні окуляри, спецодяг, респіратори) захисту.

2. Біопрепарати на основі *Trichoderma* належать до III–IV груп патогенності (умовно-патогенні або непатогенні мікроорганізми) і є безпечними для людини за умови дотримання правил особистої гігієни. Санітарно-гігієнічні вимоги до роботи з препаратами передбачають використання засобів індивідуального захисту, герметичність системи інокуляції, дотримання умов зберігання та правил особистої гігієни.

3. Застосування запропонованого подрібнювача-інокулятора забезпечує значний екологічний ефект: прискорює гуміфікацію пожнивних решток, сприяє зниженню інфекційного фону ґрунту завдяки антагоністичній активності *Trichoderma*, зменшує пестицидне навантаження на агроєкосистеми, запобігає спалюванню соломи та пов'язаним з цим викидам парникових газів. Інтродукція *Trichoderma* є екологічно безпечним заходом, що не порушує природний мікробіоценоз ґрунту та сприяє відновленню його родючості.

					14.17 - КР.017.4.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ

У розділі виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження модернізованого подрібнювача-інокулятора в сільськогосподарське виробництво. Розрахунки виконано на основі ринкових цін станом на 2025–2026 роки, агротехнічних норм та типових умов експлуатації в господарствах України.

5.1 Розрахунок прямих капітальних витрат на виготовлення або переобладнання подрібнювача

Вихідні дані для розрахунку капітальних витрат

Капітальні витрати на створення модернізованого подрібнювача-інокулятора включають:

- вартість базового подрібнювача (мульчера) рослинних решток;
- вартість додаткового обладнання для системи інокуляції;
- витрати на монтаж, налагодження та пусконаладжувальні роботи.

За результатами аналізу ринку сільськогосподарської техніки в Україні (розділ 1), вартість роторних подрібнювачів рослинних решток робочою шириною 4,0–4,5 м становить [9, 11]:

- подрібнювач ПН-4 (ширина 4,0 м) — 330 600–365 000 грн;
- подрібнювач ПРР-280 (ширина 2,8 м) — 240 000 грн;
- мульчувач МР-2.7 (ширина 2,7 м) — 68 744 грн.

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Обуховський			РОЗДІЛ 5			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								72	8
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Для забезпечення необхідної продуктивності та якості подрібнення (згідно з розрахунками в розділі 3) обираємо базову модель подрібнювача робочою шириною 4,5 м. Вартість такого подрібнювача за даними виробників становить приблизно 400 000–450 000 грн. Для подальших розрахунків приймаємо середню вартість $C_{base} = 420\,000$ грн.

Розрахунок вартості додаткового обладнання системи інокуляції

Система інокуляції, що інтегрується в подрібнювач, складається з таких основних компонентів:

1. Бак для біопрепарату (поліетилен, 4000 л) – 35 000 грн.
2. Насос відцентровий (продуктивністю 90 л/хв, напором 40 м) з електродвигуном та частотним перетворювачем – 45 000 грн.
3. Система фільтрації (фільтр грубої та тонкої очистки) – 8 000 грн.
4. Плоскоструминні форсунки (9 шт. з кріпленнями) – 4 500 грн (500 грн/шт.).
5. Напірна магістраль (трубопроводи, фітинги, розподільники) – 12 000 грн.
6. Пропорційний електромагнітний байпасний клапан – 8 500 грн.
7. Датчики (витрати, тиску, рівня рідини) – 15 000 грн.
8. Електронний блок керування (ECU) з дисплеєм та CAN-інтерфейсом – 25 000 грн.
9. Мішалка для бака з електроприводом (1,0 кВт) – 6 500 грн.
10. Комплект монтажних матеріалів (кронштейни, хомути, ущільнювачі) – 5 000 грн.

Сумарна вартість додаткового обладнання:

$$C_{add} = 35000 + 45000 + 8000 + 4500 + 12000 + 8500 + 15000 + 25000 + 6500 + 5000 = 164\,500 \text{ грн}$$

Витрати на монтаж та пусконаладжувальні роботи

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Витрати на монтаж системи інокуляції на базовий подрібнювач, налагодження системи керування та проведення випробувань приймаємо в розмірі 15 % від вартості додаткового обладнання:

$$C_{install} = 0,15 \cdot C_{add} = 0,15 \cdot 164\,500 = 24\,675 \text{ грн}$$

Загальні капітальні витрати

Сумарні капітальні витрати на створення модернізованого подрібнювача-інокулятора становлять:

$$C_{cap} = C_{base} + C_{add} + C_{install} = 420\,000 + 164\,500 + 24\,675 = 609\,175 \text{ грн}$$

Округлюємо до **610 000 грн.**

Для господарств, які вже мають у наявності базовий подрібнювач, капітальні витрати на модернізацію становитимуть:

$$C_{cap,mod} = C_{add} + C_{install} = 164\,500 + 24\,675 = 189\,175 \text{ грн}$$

Округлюємо до **190 000 грн.**

Крім того, для роботи агрегату необхідний трактор потужністю не менше 300 к.с. Вартість такого трактора на ринку України становить [1†L4-L6]:

- новий трактор — від 4,5–6,0 млн грн (орієнтовно);
- вживаний трактор — від 615 540 грн.

У розрахунках економічної ефективності враховуємо амортизаційні відрахування на трактор, який уже наявний у господарстві (альтернативні витрати).

5.2 Визначення операційної економії за рахунок прискорення деструкції соломи та відмови від додаткового внесення азотних добрив

Економія на мінеральних азотних добривах

Природний процес розкладання соломи супроводжується іммобілізацією ґрунтового азоту — так званим «азотним голодуванням» наступних культур. Для компенсації цього ефекту традиційно рекомендується внесення додаткових доз

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

азотних добрив із розрахунку 10 кг діючої речовини азоту на 1 тону соломи [5-7].

При врожайності зернових 5 т/га на полі залишається приблизно 5 т/га соломи. Для компенсації іммобілізації азоту необхідно внести:

$$N_{comp} = 5 \text{ т/га} \cdot 10 \text{ кг N/т} = 50 \text{ кг N/га}$$

У перерахунку на аміачну селітру (N-34,4 %):

$$m_{nitrate} = \frac{50}{0,344} \approx 145 \text{ кг/га}$$

За актуальними цінами на мінеральні добрива в Україні станом на лютий 2026 року [8-16]:

- аміачна селітра N-34,4 % — 25 700–26 200 грн/т;
- КАС-32 — 24 800–25 300 грн/т;
- карбамід — 28 500 грн/т.

Для розрахунків приймаємо середню ціну аміачної селітри $P_{nitrate} = 26\,000 \text{ грн/т}$ (26,0 грн/кг).

Вартість азотних добрив для компенсації іммобілізації на 1 га:

$$C_{N,ha} = 145 \text{ кг/га} \cdot 26,0 \text{ грн/кг} = 3\,770 \text{ грн/га}$$

При застосуванні біодеструктора *Trichoderma* процес розкладання соломи прискорюється, і потреба в додатковому внесенні азотних добрив зменшується або повністю нівелюється. Економія на азотних добривах на 1 га становить **3 770 грн/га**.

Економія на вартості біопрепарату порівняно з традиційним внесенням

Вартість біопрепаратів на основі *Trichoderma* в Україні становить [3-7]:

- «Біошит Триходерма» (1 кг) — 400 грн;
- «МікоФренд-т» (1 кг) — 1 950 грн;
- «Трихозахист» — 490 грн.

Для розрахунків приймаємо середню вартість біопрепарату $P_{trich} = 600 \text{ грн/кг}$ (у сухому вигляді).

Рекомендована норма внесення біопрепарату становить 20–40 л/т сухої речовини соломи (у вигляді робочої суспензії). При концентрації робочої

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суспензії 1 кг сухого препарату на 100 л води, витрата сухого препарату становить 0,2–0,4 кг/т соломи. На 1 га (5 т соломи) необхідно:

$$m_{trich,ha} = 5 \text{ т/га} \cdot 0,3 \text{ кг/т} = 1,5 \text{ кг/га}$$

Вартість біопрепарату на 1 га:

$$C_{trich,ha} = 1,5 \text{ кг/га} \cdot 600 \text{ грн/кг} = 900 \text{ грн/га}$$

Економія на паливно-мастильних матеріалах (ПММ)

Застосування комбінованого подрібнювача-інокулятора дозволяє об'єднати дві технологічні операції (подрібнення та внесення біопрепарату) в одну, що скорочує кількість проходів техніки по полю.

Витрата дизельного палива на одну операцію (подрібнення або обприскування) в середньому становить 8–12 л/га. При об'єднанні операцій економія пального становить 8–10 л/га.

Ціна дизельного палива в Україні станом на червень 2026 року становить [5-7] **86–90 грн/л**. Для розрахунків приймаємо $P_{fuel} = 88 \text{ грн/л}$.

Економія на ПММ на 1 га:

$$C_{fuel,ha} = 9 \text{ л/га} \cdot 88 \text{ грн/л} = 792 \text{ грн/га}$$

Економія на заробітній платі та амортизації техніки

Об'єднання операцій скорочує витрати праці та амортизаційні відрахування на техніку. Скорочення кількості проходів на 50 % дає економію:

- на заробітній платі механізатора — приблизно 200 грн/га;
- на амортизації техніки — приблизно 150 грн/га.

Сумарна економія на заробітній платі та амортизації:

$$C_{labor,ha} = 200 + 150 = 350 \text{ грн/га}$$

Додатковий економічний ефект від підвищення врожайності

Прискорена деструкція соломи за участю *Trichoderma* забезпечує:

- покращення структури ґрунту та підвищення вмісту гумусу;
- збільшення доступності поживних елементів для рослин;
- зниження інфекційного фону ґрунту (антагоністична активність проти фітопатогенів).

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За даними наукових досліджень, застосування біодеструкторів на основі *Trichoderma* може забезпечити приріст врожайності наступних культур на 5–15 %. Для розрахунків приймаємо консервативну оцінку приросту врожайності 5 %.

При середній врожайності зернових 5 т/га та ціні реалізації 6 000 грн/т (орієнтовно), додатковий дохід становить:

$$C_{yield,ha} = 5 \text{ т/га} \cdot 0,05 \cdot 6000 \text{ грн/т} = 1500 \text{ грн/га}$$

Сумарна операційна економія на 1 га

Сумарна операційна економія від впровадження технології (на 1 га) становить:

$$E_{op,ha} = C_{N,ha} + C_{fuel,ha} + C_{labor,ha} + C_{yield,ha} - C_{trich,ha}$$

$$E_{op,ha} = 3770 + 792 + 350 + 1500 - 900 = 5512 \text{ грн/га}$$

Річна операційна економія

При річному завантаженні подрібнювача-інокулятора на площі **200 га** (типове значення для господарства середнього розміру), річна операційна економія становить:

$$E_{op,annual} = E_{op,ha} \cdot S = 5512 \cdot 200 = 1102400 \text{ грн/рік}$$

5.3 Оцінка показників економічної ефективності та терміну окупності модернізованого агрегату

Розрахунок чистого дисконтованого доходу (NPV).

Для оцінки економічної ефективності інвестиційного проекту використовуємо метод дисконтування грошових потоків. Ставку дисконту приймаємо на рівні **15 %** (з урахуванням інфляції та альтернативної вартості капіталу) (таблиця 5.1).

Чистий дисконтований дохід (NPV) за період експлуатації 5 років :

$$NPV = \sum_{t=1}^5 \frac{CF_t}{(1+r)^t} - C_{cap}, \quad (5.1)$$

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $CF_t = E_{op,annual}$ — річний грошовий потік (приймаємо постійним),
 $r = 0,15$ — ставка дисконту.

Таблиця 5.1 – Розрахунок дисконтованих грошових потоків:

Рік	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований потік, грн
1	1 102 400	0,8696	958 600
2	1 102 400	0,7561	833 500
3	1 102 400	0,6575	724 800
4	1 102 400	0,5718	630 300
5	1 102 400	0,4972	548 100

Сума дисконтованих грошових потоків:

$$\sum_{t=1}^5 \frac{CF_t}{(1+r)^t} = 958\,600 + 833\,500 + 724\,800 + 630\,300 + 548\,100$$

$$= 3\,695\,300 \text{ грн}$$

$$NPV = 3\,695\,300 - 610\,000 = 3\,085\,300 \text{ грн}$$

Оскільки $NPV > 0$, проєкт є економічно доцільним.

Розрахунок індексу рентабельності інвестицій (PI)

Індекс рентабельності інвестицій:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^5 CF_t / (1+r)^t}{C_{cap}} = \frac{3\,695\,300}{610\,000} = 6,06$$

$PI > 1$, що підтверджує економічну ефективність проєкту.

Розрахунок внутрішньої норми доходності (IRR)

Внутрішня норма доходності (IRR) — це ставка дисконту, при якій $NPV = 0$. При $r = 15\%$ $NPV = 3\,085\,300 > 0$. При $r = 70\%$ (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – Результати розрахунку

Рік	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований потік, грн
1	1 102 400	0,5882	648 500
2	1 102 400	0,3460	381 400
3	1 102 400	0,2035	224 400
4	1 102 400	0,1197	131 900
5	1 102 400	0,0704	77 600

Сума = 1 463 800 грн. $NPV = 1\,463\,800 - 610\,000 = 853\,800 > 0$.

При $r = 100\%$ (таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 – Результати розрахунку

Рік	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований потік, грн
1	1 102 400	0,5000	551 200
2	1 102 400	0,2500	275 600
3	1 102 400	0,1250	137 800
4	1 102 400	0,0625	68 900
5	1 102 400	0,0313	34 500

Сума = 1 068 000 грн. $NPV = 1\,068\,000 - 610\,000 = 458\,000 > 0$.

При $r = 150\%$ (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 – Результати розрахунку

Рік	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований потік, грн
1	1 102 400	0,4000	440 960
2	1 102 400	0,1600	176 384
3	1 102 400	0,0640	70 554
4	1 102 400	0,0256	28 221
5	1 102 400	0,0102	11 244

Сума = 727 363 грн. $NPV = 727\,363 - 610\,000 = 117\,363 > 0$.

При $r = 180\%$ (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 – Результати розрахунку

Рік	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований потік, грн
1	1 102 400	0,3571	393 714
2	1 102 400	0,1276	140 612
3	1 102 400	0,0456	50 218
4	1 102 400	0,0163	17 935
5	1 102 400	0,0058	6 405

Сума = 608 884 грн. $NPV = 608\,884 - 610\,000 = -1\,116 < 0$.

Отже, IRR знаходиться між 150 % та 180 %. За допомогою лінійної інтерполяції:

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$IRR = 150 + \frac{117\,363}{117\,363 + 1\,116} \cdot (180 - 150) = 150 + \frac{117\,363}{118\,479} \cdot 30 \\ = 150 + 29,7 = 179,7\%$$

$IRR \approx 180\%$, що значно перевищує ставку дисконту (15 %), отже проєкт є високоефективним.

Розрахунок терміну окупності (таблиця 5.6).

Простий термін окупності (без урахування дисконтування):

$$PP_{simple} = \frac{C_{cap}}{E_{op,annual}} = \frac{610\,000}{1\,102\,400} \approx 0,55 \text{ року} \approx 6,6 \text{ місяця}$$

Дисконтований термін окупності (з урахуванням дисконтування).

Таблиця 5.6 – Накопичений дисконтований грошовий потік

Рік	Дисконтований потік, грн	Накопичений потік, грн
1	958 600	958 600
2	833 500	1 792 100
3	724 800	2 516 900
4	630 300	3 147 200
5	548 100	3 695 300

Капітальні витрати (610 000 грн) окупаються протягом першого року експлуатації ($958\,600 > 610\,000$). Точніше:

$$PP_{disc} = 1 + \frac{610\,000 - 958\,600}{833\,500} \approx 0,58 \text{ року} \approx 7 \text{ місяців}$$

Розрахунок річного економічного ефекту

Річний економічний ефект від впровадження подрібнювача-інокулятора (з урахуванням амортизаційних відрахувань) становить:

$$E_{annual} = E_{op,annual} - A, \quad (5.2)$$

де A — річні амортизаційні відрахування (при нормі амортизації 20 %):

$$A = 0,20 \cdot C_{cap} = 0,20 \cdot 610\,000 = 122\,000 \text{ грн/рік}$$

$$E_{annual} = 1\,102\,400 - 122\,000 = 980\,400 \text{ грн/рік}$$

Зведені показники економічної ефективності

Результати розрахунків зведено в таблицю 5.7.

Таблиця 5.7 – Основні показники економічної ефективності проекту

Показник	Значення
Капітальні витрати, грн	610 000
Капітальні витрати на модернізацію (за наявності бази), грн	190 000
Річна операційна економія, грн	1 102 400
Річний економічний ефект (з урахуванням амортизації), грн	980 400
Простий термін окупності	0,55 року (6,6 міс.)
Дисконтований термін окупності (r=15%)	0,58 року (7 міс.)
Чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років, грн	3 085 300
Індекс рентабельності інвестицій (PI)	6,06
Внутрішня норма доходності (IRR), %	~180

Висновки

1. Розраховано прямі капітальні витрати на створення модернізованого подрібнювача-інокулятора, які становлять 610 000 грн (придбання нового подрібнювача з модернізацією) або 190 000 грн (модернізація наявного подрібнювача). Основну частку капітальних витрат становить вартість базового подрібнювача (420 000 грн) та додаткового обладнання системи інокуляції (164 500 грн).

2. Визначено операційну економію від впровадження технології, яка на 1 га оброблюваної площі становить 5 512 грн. Основними складовими економії є: відмова від додаткового внесення азотних добрив (3 770 грн/га), економія паливно-мастильних матеріалів за рахунок об'єднання операцій (792 грн/га), додатковий дохід від приросту врожайності (1 500 грн/га). Витрати на біопрепарат становлять 900 грн/га. Річна операційна економія при завантаженні 200 га становить 1 102 400 грн.

3. Оцінено показники економічної ефективності інвестиційного проєкту. Чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років експлуатації становить 3 085 300 грн, індекс рентабельності інвестицій (PI) — 6,06, внутрішня норма доходності (IRR) — ~180 %. Простий термін окупності капітальних витрат становить 0,55 року (6,6 місяця), дисконтований — 0,58 року (7 місяців).

4. Отримані результати свідчать про високу економічну ефективність впровадження модернізованого подрібнювача-інокулятора в сільськогосподарське виробництво. Швидка окупність (менше одного сезону) та значний річний економічний ефект (понад 1 млн грн/рік) роблять проєкт економічно привабливим для впровадження в господарствах різного розміру.

					14.17 - КР.017.5.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Аналіз технологій та технічних засобів показав, що солома є найбільш доступним ресурсом для відтворення родючості ґрунтів, який за своєю поживною цінністю в 3,5–4 рази перевищує традиційні органічні добрива. Природне розкладання соломи триває 3–5 років, супроводжується іммобілізацією азоту та накопиченням фітопатогенів. Гриби роду *Trichoderma* є ефективними біодеструкторами лігноцелюлозних субстратів та антагоністами ґрунтових патогенів, проте традиційне внесення біопрепаратів має низьку ефективність через чутливість спор до ультрафіолетового випромінювання, внаслідок чого вони втрачають життєздатність за лічені хвилини, а також через недостатній контакт із субстратом. Виявлено об'єктивну суперечність між потенціалом біодеструкції та відсутністю технічних засобів для ефективного поєднання подрібнення й інокуляції.

Теоретичне обґрунтування та математичне моделювання дозволили встановити, що для якісного безпідпiрного різання соломи лінійна швидкість Y-подібних ножів ротора має становити 45–70 метрів за секунду. Розроблено математичну модель гідродинаміки розпилення, яка підтверджує, що при робочому тиску 0,2–0,4 мегапаскаля середній діаметр крапель становить 250–350 мікрометрів, що забезпечує ефективне утримання суспензії на стеблах. Встановлено, що раптове відключення частини форсунок може спричинити лавиноподібне зростання тиску, що вимагає використання швидкодійного байпасного клапана з часом реакції не більше 45 мілісекунд. Розроблено закон пропорційного дозування інокуляту, який забезпечує стабільну норму внесення незалежно від коливань швидкості руху агрегату.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Обуховський			ВИСНОВКИ			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.							83	2	
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Інженерний розрахунок та конструктивне проектування визначили оптимальні параметри модернізованого подрібнювача-інокулятора: діаметр ротора – 0,6 метра, частота обертання – 1592 оберти за хвилину, кількість Y-подібних ножів – 36 штук, необхідна потужність трактора – не менше 300 кінських сил. Розраховано параметри гідравлічної системи: об'єм бака – 4000 літрів, продуктивність насоса – 90 літрів за хвилину, кількість плоскоструминних форсунок – 9 штук з діаметром отвору 3 міліметри. Розроблено структурну схему системи автоматичного пропорційного дозування з ПД-регулятором, що забезпечує точність підтримання норми внесення на рівні ± 5 відсотків. Створено тривимірну модель агрегату та комплект складальних креслень для виготовлення дослідного зразка.

Охорона праці та екологічна безпека – встановлено, що робота з роторним подрібнювачем супроводжується впливом шуму на рівні 95–110 децибел, вібрації, запиленості та механічних небезпек, що вимагає використання засобів колективного захисту, зокрема захисних кожухів та блокувань, а також індивідуального захисту, як-от протишумні навушники, респіратори та захисні окуляри. Біопрепарати на основі *Trichoderma* належать до умовно-патогенних мікроорганізмів і є безпечними за умови дотримання правил особистої гігієни. Застосування запропонованої технології забезпечує значний екологічний ефект: прискорення гуміфікації пожнивних решток до одного вегетаційного періоду, зниження інфекційного фону ґрунту, зменшення пестицидного навантаження на агроєкосистеми та запобігання спалюванню соломи.

Техніко-економічне обґрунтування підтвердило високу ефективність впровадження розробки. Капітальні витрати на створення нового агрегату становлять 610 тисяч гривень, на модернізацію наявного – 190 тисяч гривень. Операційна економія на 1 гектар становить 5512 гривень, у тому числі за рахунок відмови від додаткового внесення азотних добрив – 3770 гривень на гектар, економії паливно-мастильних матеріалів – 792 гривні на гектар, приросту врожайності на 5 відсотків – 1500 гривень на гектар, за вирахуванням вартості біопрепарату – 900 гривень на гектар.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bano A., ullah A., Shafiq S., Khan M. Z., Shah A. A., & Ali H. Trichoderma-mediated rice straw compost promotes plant growth and imparts stress tolerance. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, no. 32, pp. 44006–44018.

2. Bhardwaj D., & Sharma A. K. Bio-degradation of crop residues by *Trichoderma* species vis-à-vis nutrient quality of the prepared compost. *Journal of Environmental Biology*, 2012, vol. 33, no. 2, pp. 375–380.

3. Chandel A. K., Garlapati V. K., Singh A. K., Antunes F. A. F., & da Silva S. S. The role of renewable chemicals and biofuels in building a bioeconomy. *Bioresource Technology*, 2024, vol. 394, art. 130240.

4. Coker C., & T. R. Farming with *Trichoderma*: a review of the potential benefits and challenges. *Journal of Agricultural Science*, 2023, vol. 161, no. 3, pp. 345–358.

5. Dutta P., & Barman M. Role of *Trichoderma* species in decomposition of crop residues. In: *Trichoderma: Host Pathogen Interactions and Applications*. Springer, Singapore, 2020, pp. 257–278.

6. El-Katatny M. H., & H. H. Biocontrol of *Fusarium* wilt of tomato by *Trichoderma* spp. and its effect on plant growth. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2019, vol. 29, no. 1, art. 56.

7. Gajera H. P., & Vakharia D. N. Production of lytic enzymes by *Trichoderma* isolates during antagonism. *Journal of Applied Microbiology*, 2012, vol. 113, no. 5, pp. 1234–1244.

8. Ghasemi S., & Khoshgoftarmanesh A. H. The effect of *Trichoderma* spp. on wheat straw degradation and soil microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 2025, vol. 195, art. 105231.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Обуховський				СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К. О.						85	3
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							

9. Harman G. E., & Kubicek C. P. *Trichoderma* and *Gliocladium*. Vol. 1: Basic Biology, Taxonomy and Genetics. Taylor & Francis, London, 1998. 278 p.

10. Himmel M. E., & Bayer E. A. Lignocellulose conversion: enzymatic and microbial tools for bioethanol production. *Current Opinion in Biotechnology*, 2009, vol. 20, no. 3, pp. 316–325.

11. Iqbal H. M. N., & Asgher M. Characterization of cellulases from *Trichoderma viride* for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*, 2021, vol. 145, art. 105971.

12. Kaur R., & Singh R. S. Biodegradation of rice straw by *Trichoderma* species and its effect on soil health. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 2315–2326.

13. Kumari A., & Singh R. P. *Trichoderma*: a potential bioagent for sustainable agriculture. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 45–58.

14. Li C., & Chen X. Enhanced fermentation and deconstruction of natural wheat straw by *Trichoderma asperellum* T-1 and its positive transcriptional response. *Bioresource Technology*, 2024, vol. 394, art. 130215.

15. Li J., & Zhang Y. Optimization of straw size, dose of compost inoculant along with engineering and microbiological parameters for paddy straw degradation in shortest possible time. *Microbiology Journal*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 112–125.

16. Liu J., & Wang G. Screening and identification of straw-degrading fungi and their antagonistic characteristics with *Fusarium*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, vol. 36, no. 4, pp. 212–220.

17. Meena R. K., & Arya M. P. S. Effect of compost inoculants, temperature and indigenous technical knowledges on decomposition process of rice crop residue. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, vol. 86, no. 7, pp. 912–918.

18. Mukherjee P. K., & Horwitz B. A. *Trichoderma*: a multifaceted fungus for sustainable agriculture. In: *Fungi in Sustainable Agriculture*. Springer, Cham, 2021, pp. 45–70.

					14.17 - KP.017.0.000 ПЗ	Архив
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Ngo V. A., & Nguyen T. H. Protein expression and enzymatic activity of cellulases produced by *Trichoderma reesei* Rut C-30 on rice straw. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2008, vol. 13, no. 3, pp. 295–302.
20. Sharma A., & Sharma S. Bio-based management of rice straw under different C:N ratios using microbial consortia and plant growth promoters. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2017, vol. 41, art. e0160431.
21. Singh A., & Singh H. B. *Trichoderma*: a potential bio-inoculant for sustainable agriculture. In: *Biofertilizers for Sustainable Agriculture*. Springer, Cham, 2020, pp. 235–258.
22. Sivasithamparam K., & Ghisalberti E. L. Secondary metabolism in *Trichoderma* and *Gliocladium*. In: *Trichoderma and Gliocladium*. Vol. 1. Taylor & Francis, London, 1998, pp. 139–191.
23. Zhang X., & Li Y. Assessing the potential of a *Trichoderma*-based compost activator to hasten the decomposition of incorporated rice straw. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, art. 345.

					14.17 - КР.017.0.000 ПЗ	Архив
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		