

**ДНПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра інжинірингу технічних систем

**Пояснювальна записка**

до дипломної роботи

рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

**Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів обладнання для  
прискороного біотермічного компостування гною**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Жаріков Дмитро Олександрович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Дудін Володимир Юрійович

**Рецензент:** \_\_\_\_\_ Потеруха Борис Тарасович

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем  
Рівень вищої освіти: «Магістр»  
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
ІТС

(назва кафедри)

**ДОЦЕНТ**

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Жарікову Дмитру Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів обладнання для прискороного біотермічного компостування гною

керівник роботи: Дудін Володимир Юрійович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від  
« 24 » жовтня 2025 року № 3182

**2. Строк подання студентом роботи** 12.12.2025 р. .

**3. Вихідні дані до роботи** Аналіз стану питання процесів та обладнання для системи опалення птахівничих приміщень. Аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз сучасних технологій та технічних засобів аерації компостних мас. 2. Теоретичні дослідження. 3. Досліди в лабораторних умовах 4. Охорона праці. 5. Економічне обґрунтування та вибір найбільш економічно доцільного варіанту. Загальні висновки. Бібліографічний список

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (3 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (3 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (2 аркуші, А4). 4. Охорона праці (1 аркуш, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-5	Дудін В.Ю., доцент		
Нормоконтроль	Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 12.11.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 01.10.2025 р.	
2	Теоретичний	до 20.10.2025 р.	
3	Експериментальний	до 09.11. 2025 р.	
4	Охорона праці	до 19.11. 2025 р.	
5	Економічний	до 26.11. 2025 р.	
6	Демонстраційна частина	до 30.11. 2025 р.	

Студент

\_\_\_\_\_ ( підпис )

Жаріков Д.О.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Дудін В.Ю.



## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>7</b>
<b>1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АЕРАЦІЇ КОМПОСТНИХ МАС</b> .....	<b>9</b>
1.1. Технології обробки підстилкового гною.....	9
1.2 Огляд сучасних конструкцій аераторів та їх принципу дії.....	15
1.3 Огляд наукових досліджень.....	21
1.3.1 Аналіз патентів .....	21
1.3.2 Аналіз наукових статей.....	33
1.4 Висновок до розділу.....	41
<b>2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	<b>43</b>
2.1 Схема установки.....	43
2.2 Методи досліджень та обробки інформації.....	45
2.2.1 Проведення чисельного моделювання.....	45
2.2.2 Методи обробки результатів дослідження .....	54
2.3 Результати досліджень.....	57
2.4 Висновок до розділу.....	61
<b>3. ДОСЛІДИ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ</b> .....	<b>63</b>
3.1 Програма лабораторних досліджень .....	63
3.2 Методика лабораторних досліджень .....	64
3.3 Результати лабораторних досліджень .....	65
3.4 Висновок до розділу.....	70
<b>4. ОХОРОНА ПРАЦІ</b> .....	<b>71</b>
4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з аератором компостних буртів.....	71
4.2 Інструкція з охорони праці при роботі з аератором компостних буртів.....	72
4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях.....	73
4.4 Висновки до розділу.....	74
<b>5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР НАЙБІЛЬШ ЕКОНОМІЧНО ДОЦІЛЬНОГО ВАРІАНТУ</b> .....	<b>75</b>
5.1 Вихідні дані.....	75
5.2 Висновок до розділу .....	77
<b>ВИСНОВОК</b> .....	<b>78</b>
<b>Список використаних джерел</b> .....	<b>80</b>

Жаріков Д.О. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів обладнання для прискореного біотермічного компостування гною /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Дипломна кваліфікаційна робота складається зі вступу та п'яти змістовних розділів, у яких представлено комплексне вдосконалення конструкції молоткової дробарки для подрібнення кормових матеріалів. У процесі дослідження виконано аналітичний огляд сучасних технічних рішень, обґрунтовано вибір основних параметрів та розроблено конструкцію дослідного зразка малогабаритного подрібнювача із застосуванням монолітних ударних молотків, що забезпечують підвищену надійність, тривалий ресурс роботи та стабільність показників подрібнення.

Окремий розділ присвячено питанням охорони праці та техніки безпеки під час експлуатації дробильного обладнання на кормоцехах. Надано рекомендації щодо зменшення виробничих ризиків, мінімізації травмонебезпечних факторів, а також підвищення ергономічності та безпеки умов праці обслуговуючого персоналу.

Крім того, проведено економічне обґрунтування ефективності впровадження удосконаленого подрібнювача у виробництво. Виконано порівняльний аналіз із серійними аналогами, визначено техніко-економічні показники, строк окупності та економічні переваги запропонованої модернізації.

Ключові слова: аерація, компост, аератор, моделювання, оптимізація, параметр.

## ВСТУП

Сучасне сільськогосподарське виробництво висуває підвищені вимоги до ефективного та екологічно безпечного поводження з органічними відходами, серед яких гній займає значну частку. Традиційні методи його компостування характеризуються тривалістю, нерівномірністю перебігу біотермічних процесів та значними втратами поживних речовин, що знижує господарську цінність кінцевого продукту. У зв'язку з цим актуальним є впровадження технологій інтенсивної аерації та механічного перемішування, які здатні суттєво прискорити компостування, забезпечити стабільність параметрів процесу та підвищити якість отриманих органічних добрив.

Одним із ключових елементів таких технологій є аераційно-перемішувальне обладнання, ефективність роботи якого значною мірою залежить від конструктивних і режимних параметрів робочих органів. Зокрема, кут установки лопатей, частота обертання барабана та швидкість поступального руху агрегату визначають інтенсивність переміщення матеріалу, ступінь його подрібнення та формування компостного бурта. Незважаючи на поширення подібних конструкцій у практиці тваринницьких господарств, питання їх раціонального налаштування в умовах різної вологості, густини та структурних властивостей сумішей залишаються недостатньо дослідженими.

Важливість вирішення даної проблеми зумовлюється як зростаючою потребою аграрних підприємств у високоякісних органічних добривах, так і необхідністю мінімізації витрат на їх виробництво.

У роботі розглядається комплексний підхід до оцінювання впливу зазначених факторів на процес перемішування гною в барабанному аераторі. Для цього використано поєднання чисельного моделювання, лабораторних експериментів на фізичній моделі та аналітичного оброблення результатів із застосуванням методів математичного планування експерименту. Такий підхід забезпечує отримання достовірних даних щодо характеру впливу окремих параметрів, дозволяє побудувати регресійні моделі процесу та визначити оптимальні режими роботи обладнання.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні кількісних залежностей між кутом установки лопатей, частотою обертання барабана, швидкістю руху агрегату та показниками інтенсивності перемішування - силою струму приводу та висотою сформованого бурта. Практична цінність дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для підвищення ефективності реальних машин та технологій прискореного біотермічного компостування органічних відходів.

Метою дослідження є обґрунтування та дослідження конструктивно-технологічних параметрів обладнання для прискореного біотермічного компостування гною з визначенням оптимальних режимів роботи, що забезпечують найвищу якість перемішування та енергетичну ефективність процесу.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

- проведення аналізу сучасних технологій та обладнання для аераційного компостування;
- виконання чисельного моделювання процесу перемішування з урахуванням структурних властивостей матеріалу;
- проведення лабораторних досліджень на фізичній моделі аератора;
- побудова регресійних моделей впливу основних факторів;
- визначення оптимальних режимів роботи за критеріями енерговитрат та формування бурта;
- проведення економічного обґрунтування вибраного оптимального варіанту.

Об'єкт дослідження - процес перемішування компостної суміші лопатевим барабаном.

Предмет дослідження - конструктивні та режимні параметри барабана, що визначають ефективність перемішування, однорідність суміші, висоту бурта та енергетичні витрати.

# 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АЕРАЦІЇ КОМПОСТНИХ МАС

## 1.1. Технології обробки підстилкового гною

Переробка гною сільськогосподарських тварин є невід'ємною складовою сучасного агровиробництва, адже сприяє зниженню негативного впливу на довкілля, раціональному використанню ресурсів та отриманню цінних вторинних продуктів.

Сьогодні застосовують низку технологій, спрямованих на ефективне управління органічними відходами. Однією з найпоширеніших є компостування - процес біологічного розкладу гною в суміші з іншими органічними компонентами під дією мікроорганізмів. У результаті утворюється поживний компост, придатний для використання як високоякісне органічне добриво.

Іншою технологією переробки є анаеробне бродіння, під час якого гній у безкисневих умовах перетворюється на біогаз. Такий процес дає змогу не лише скоротити обсяг відходів, а й отримати метан, який може використовуватися як паливо для опалення або виробництва електроенергії.

Водна обробка полягає у використанні води для розчинення та розрідження органічних часток гною, що спрощує його транспортування та подальшу переробку. Також застосовується технологія сухого зберігання, за якої гній утримується в умовах, що перешкоджають його розкладанню, зменшуючи виділення неприємних запахів і шкідливих газів.

Ще одним перспективним напрямом є біологічне очищення, яке базується на використанні спеціально підібраних мікроорганізмів, здатних перетворювати гній на безпечні сполуки, придатні для застосування у сільському господарстві або для отримання технічної води.

Застосування таких технологій сприяє раціональному використанню природних ресурсів, зменшенню екологічного навантаження та підвищенню екологічної стійкості аграрного виробництва.

Продовжуючи розгляд питань, пов'язаних із переробкою гною сільськогосподарських тварин, варто відзначити впровадження сучасних

технологічних рішень, спрямованих на оптимізацію виробничих процесів і зменшення негативного впливу на довкілля.

Одним із ефективних напрямів є технології термічної обробки, суть яких полягає у нагріванні гною до високих температур. Такий процес забезпечує знезараження матеріалу від патогенних мікроорганізмів, скорочення його об'єму та дає змогу отримувати енергоносії. Термічні методи, зокрема піроліз і газифікація, дозволяють утворювати газоподібні продукти, що можуть бути використані для виробництва теплової або електричної енергії.

Іншим перспективним напрямом є ферментація, яка сприяє зменшенню об'єму гною та покращенню його агрономічних властивостей. Залежно від поставлених цілей, процес може відбуватися в аеробних або анаеробних умовах. У результаті ферментації формується активна мікрофлора, що позитивно впливає на ґрунтову біоту та ріст рослин.

Окрему увагу заслуговує інтеграція агрономічних і технологічних систем у сфері обробки гною. Використання біофільтрів і систем очищення стічних вод дає змогу не лише очищати рідкі фракції, а й повертати поживні речовини в агросистему, формуючи замкнений біотехнологічний цикл. Це сприяє скороченню витрат на мінеральні добрива та підвищенню екологічної ефективності виробництва.

Важливу роль відіграють також інформаційні технології, які застосовуються для моніторингу, автоматизації та управління процесами переробки. Завдяки «розумним» системам управління можна оптимізувати використання ресурсів, контролювати викиди та санітарний стан майданчиків, а також підвищувати енергетичну ефективність установок.

Загалом, комплексна інтеграція сучасних технологій обробки та утилізації гною створює передумови для сталого розвитку сільського господарства, підвищує його продуктивність, знижує екологічне навантаження й відповідає сучасним вимогам до екологічної безпеки та якості агропродукції.

Розглядаючи сучасні технології обробки та переробки гною, доцільно акцентувати увагу не лише на технічних, а й на економічних та екологічних

аспектах їх упровадження. Економічна ефективність вибраного методу значною мірою визначається умовами конкретного господарства, видом тварин, масштабами виробництва та доступністю матеріально-технічних ресурсів.

З екологічної точки зору, переробка гною має суттєві переваги. Вона сприяє зниженню викидів парникових газів, які утворюються під час розкладу органічних речовин, та зменшує ризик забруднення ґрунтових і поверхневих вод. Правильно оброблений гній не містить небезпечних патогенів і має знижений вміст нітратів та фосфатів, що позитивно впливає на стан довкілля.

Серед сучасних напрямів розвитку цієї галузі варто відзначити біотехнологічні підходи, засновані на використанні спеціально відібраних штамів мікроорганізмів. Такі мікробні культури підвищують ефективність розкладу органічної маси, покращують стабільність процесів ферментації, сприяють виробництву біогазу й підвищують якість кінцевого продукту - компосту або органічного добрива.

Паралельно з цим зростає інтерес до інтегрованих систем, у яких процеси переробки органічних відходів поєднуються з виробництвом енергії. Наприклад, біогазові комплекси з когенераційними установками дають змогу одночасно отримувати електричну та теплову енергію, забезпечуючи більш повне використання енергетичного потенціалу сировини.

Для ефективного впровадження таких технологій важливо забезпечити співпрацю між науковими установами, агровиробниками, державними структурами та бізнесом. Розвиток наукових досліджень, системи підготовки фахівців і державна підтримка екологічно чистих інноваційних технологій здатні істотно прискорити перехід аграрного сектору до моделі сталого виробництва.

Біотермічне компостування - це технологічний процес, що передбачає перетворення органічних відходів, зокрема гною сільськогосподарських тварин, у стабільне органічне добриво шляхом природного розкладу під дією мікроорганізмів. Процес проходить за контрольованих параметрів вологості та температури, що забезпечує активний біохімічний розклад органічної маси.

Основні етапи біотермічного компостування включають:

- Підготовку матеріалів: гній змішують із структуроутворювальними компонентами (солома, листя, рослинні рештки) для оптимізації співвідношення вуглецю та азоту (C:N).
- Біотермічний етап: активна діяльність мікроорганізмів спричиняє підвищення температури до 55–70 °С, що сприяє знезараженню та знищенню насіння бур'янів.
- Дозрівання: після фази інтенсивного розкладу температура знижується, а процес гуміфікації продовжується, утворюючи стабільну органічну речовину.
- Завершення процесу: готовий компост має темно-коричневий колір, однорідну структуру та приємний ґрунтовий запах. Його використовують як органічне добриво, що підвищує родючість ґрунту та зменшує потребу в мінеральних речовинах.

Цей метод є екологічно безпечним способом утилізації гною, оскільки забезпечує зменшення обсягу відходів, покращення якості ґрунтів і скорочення викидів парникових газів, сприяючи розвитку сталого сільського господарства.

Прискорене біотермічне компостування - це вдосконалена технологія, що поєднує класичні принципи біотермічного процесу з сучасними технічними рішеннями. Завдяки механічній аерації, автоматичному контролю температури та вологості, а також використанню активних мікробних культур, час отримання готового компосту суттєво скорочується.

Переваги цього методу полягають у швидшому дозріванні матеріалу, зниженні неприємних запахів, збільшенні поживної цінності кінцевого продукту та підвищенні санітарної безпеки виробництва. Впровадження прискореного біотермічного компостування забезпечує високу енергетичну та екологічну ефективність, роблячи його одним із найперспективніших напрямів сучасної технології переробки органічних відходів.

Основні етапи прискореного біотермічного компостування:

- Підготовка матеріалів. Для забезпечення оптимального співвідношення вуглецю до азоту (C:N) гній змішують з іншими

органічними компонентами - соломою, рослинними залишками або подрібненими відходами. Така суміш створює належну структуру компостної маси, покращує її пористість і сприяє ефективній аерації.

- Контроль температури. У процесі компостування застосовуються системи термоконтролю, які підтримують оптимальні умови для розвитку мікроорганізмів. Температура всередині бурта досягає 60–70 °С, що стимулює інтенсивне розкладання органічних речовин і забезпечує знезараження матеріалу від патогенних мікроорганізмів, спор грибів і насіння бур'янів.
- Аерація. Для активізації біохімічних процесів та підтримання аеробних умов використовують механічні аератори або системи примусової вентиляції. Механічні пристрої забезпечують регулярне перемішування маси, тоді як стаціонарні аераційні труби створюють безперервний приплив повітря, необхідний для окислювальних реакцій.
- Регулювання вологості. Вологість компостної суміші є критичним фактором успішного процесу. Її підтримують у межах 50–60 %. У разі пересихання суміш зволожують, а при надмірній вологості - забезпечують дренаж або посилення вентиляції, щоб запобігти анаеробним процесам.
- Прискорене дозрівання. Завдяки автоматизованому контролю температури, вологості й аерації, а також використанню спеціально підібраних мікробіологічних препаратів (інокулянтів), компост дозріває значно швидше, ніж за традиційної технології. Тривалість цього етапу може становити від двох до чотирьох тижнів, залежно від складу сировини та режимів роботи установки.

Переваги прискореного біотермічного компостування:

- Скорочення тривалості процесу. Отримання готового компосту в кілька разів швидше, що дає змогу оперативно використовувати добрива в агровиробництві.

- Висока агрономічна цінність продукту. Готовий компост має підвищений вміст поживних елементів і покращує фізико-хімічні властивості ґрунтів.
- Зменшення неприємних запахів. Контроль параметрів процесу мінімізує виділення летких сполук, характерних для традиційного компостування.
- Покращення санітарно-екологічних умов. Технологія знижує ризик поширення патогенів і скорочує викиди парникових газів, сприяючи екологічній стабільності господарства.

У підсумку, прискорене біотермічне компостування є ефективним та енергоощадним рішенням для сучасного сільського господарства, що дозволяє зменшити обсяг відходів, підвищити продуктивність і забезпечити сталий розвиток аграрного виробництва.

У сучасних умовах розвитку аграрного сектору України питання раціональної утилізації та переробки органічних відходів тваринництва набуває особливої актуальності. Збільшення масштабів інтенсивного тваринництва, зосередженого у великих господарствах та агропромислових комплексах, призводить до накопичення значних обсягів гною, що, за відсутності належної переробки, стає потенційним джерелом забруднення довкілля - ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери.

Для України, де органічні добрива традиційно відіграють важливу роль у відтворенні родючості ґрунтів, особливого значення набуває впровадження технологій, які дозволяють ефективно переробляти гній у цінний агрономічний ресурс. Серед відомих методів переробки органічних відходів найперспективнішим є компостування, що поєднує екологічну безпеку, енергетичну доцільність і економічну ефективність.

Компостування забезпечує зменшення обсягів відходів, знешкодження патогенів і насіння бур'янів, а також збереження поживних елементів (азоту, фосфору, калію) у формах, придатних для засвоєння рослинами. Особливо актуальним це є для українських регіонів із високою концентрацією

тваринницьких комплексів - таких як Дніпропетровська, Полтавська, Черкаська, Вінницька та Львівська області, де значні обсяги гною потребують екологічно обґрунтованої переробки.

## **1.2 Огляд сучасних конструкцій аераторів та їх принципу дії**

На сьогодні технологічні засоби, що застосовуються в механізованих технологіях виробництва компосту, можна умовно поділити на три основні групи машин:

- модернізовані причепи-розкидачі органічних добрив, навантажувачі та дорожньо-будівельна техніка, адаптована до умов господарств;
- змішувачі-аератори різних типів - причіпні, навісні, самохідні або тунельні;
- змішувачі-аератори-навантажувачі безперервної дії, які можуть бути самохідними або причіпними.

Модернізація гноєрозкидачів передбачає удосконалення технологічного процесу, конструкції робочих органів і їх кінематичних параметрів. Раціонально обрані схеми роботи та параметри модернізованих машин забезпечують формування буртів заданої форми і розмірів, вибір оптимальної швидкості руху агрегату, зменшення витрат на допоміжні операції, а також економію площі майданчиків завдяки компактному укладанню буртів. Крім того, вибір типу робочих органів дає змогу ефективно подрібнювати органічну сировину залежно від її фізичного стану.

Здатність таких машин накопичувати, подрібнювати й одночасно змішувати компоненти в кузові дозволяє розглядати гноєрозкидачі як базові технічні засоби для механізованого компостування.

Аератори-змішувачі являють собою установки з горизонтально розташованими бітерними, лопатевими або зубчастими фрезерними барабанами, обладнаними обмежувальними рамками трикутної, трапецеїдальної або арочної форми заввишки 1,5–2 м. Такі аератори широко застосовуються в причіпних і самохідних машинах. Їх основними перевагами є простота конструкції, помірна енергоємність, універсальність та висока пристосованість до різних

господарських умов, що робить їх ефективними засобами для виконання операцій перемішування й аерації компостної маси.



Рис.1.1 – Аератор-змішувач моделі конструкції ІМТ НААН (Україна)

Аератори-змішувачі-навантажувачі - це спеціалізовані технічні засоби, призначені для роботи на компостувальних майданчиках. Їх застосування дає змогу зменшити потребу у використанні техніки загального призначення, зокрема бульдозерів і навантажувачів періодичної дії, оскільки такі машини поєднують кілька технологічних операцій - перемішування, аерацію та транспортування компостної маси.

Розрізняють дві основні технологічні схеми переміщення буртів (рис. 1.2–1.4):

- бокове формування бурта;
- прямотокове формування - із розташуванням бурта позаду агрегату.

За бокового формування бурта технічний засіб має ширші функціональні можливості: забезпечує інтенсивніше перемішування й аерацію матеріалу, спрощує навантажувальні операції, дозволяє збільшувати висоту буртів або об'єднувати кілька з них у спільну масу. Водночас така схема вимагає складнішої конструкції елеваторів і транспортувальних стрічкових механізмів, а також більшої потужності енергетичної установки.

Робоча швидкість таких агрегатів зазвичай становить 50–300 м/год, а продуктивність - у межах 2000–6000 т/год, що робить їх високоефективними засобами для інтенсивного механізованого компостування.



Рис.1.2 – Змішувачі-аератори-навантажувачі з боковим формуванням бурта

Подібні аератори-змішувачі-навантажувачі повною мірою забезпечують процес аерації та рівномірного перемішування компостної маси під час її транспортування, зміни напрямку потоку сировини та навантаження на висоту до 4 метрів. Такі машини призначені для роботи з великими обсягами органічної сировини, що забезпечує їх економічну доцільність у промисловому використанні.

Орієнтовно гноєрозкидачі можуть переробляти від 3 до 5 тисяч тонн підстилкового гною на рік. Якщо обсяги перевищують 5–10 тисяч тонн, доцільно застосовувати аератори-змішувачі причіпного або самохідного типу з потужністю до 100 кВт.

Причіпні аератори, як правило, агрегуються з тракторами потужністю 20–120 кВт, тоді як самохідні установки - із силовими агрегатами 30–500 кВт. Такі машини характеризуються шириною захвату 4–8 метрів і здатні формувати бурти висотою 1,5–2,5 м, що робить їх універсальними засобами для механізованого компостування у господарствах різного масштабу.

На відміну від технології природного компостування, при якій гній просто накопичується та частково розкладається протягом 4–6 місяців, прискорене компостування передбачає попереднє приготування сумішей, формування буртів і постійний контроль параметрів процесу.

Завдяки цьому досягаються високі показники якості кінцевого продукту: вміст органічної речовини у компості становить не менше 70% (за сухою масою), загальний вміст азоту - 1,9–2,28%, калію - 0,55–0,6%, фосфору - 0,5–0,6%.

Крім того, раціональне підтримання вологості субстрату запобігає втратам поживних елементів, що сприяє підвищенню ефективності процесу компостування.



Рис.1.3 – Аератор-змішувач виробництва фірми Brown Bear



Рис.1.4 – Роторний аератор-змішувач TG 301 виробництва компанії Gujer

Технологічний процес формування компостних буртів за схемою бічного підрізання загалом подібний до традиційного, однак має одну суттєву особливість: новий бурт утворюється з протилежного боку від напрямку руху машини. Обсяги переробки органічної сировини в межах цієї технології можуть

значно варіювати й залежать від типу застосованої техніки, площі компостувального майданчика та кліматичних умов регіону.

Машина, що працює за принципом бічного підрізання бурту, випускають також у навісному виконанні, що дає змогу встановлювати їх на задню навіску трактора. Продуктивність таких навісних агрегатів становить 300–500 т/год, тоді як самохідні моделі здатні забезпечувати продуктивність до 2000 т/год. Один із варіантів - самохідна ворушилка буртів із двома похилими циліндричними роторами - зображено на рис. 1.5.



а



б

Рис.1.5 – Ворушилка бічного підрізання буртів: а – Загальний вигляд, б – технологічна схема

Під час руху вздовж бурту похилі ротори заглиблюються в його бічну частину на глибину до 1 м та висоту до 3 м. Відокремлений матеріал подається похилим стрічковим транспортером і переміщується на інший бік від напрямку руху машини, формуючи новий бурт висотою до 3 м. Робоча швидкість таких машин досягає 5 км/год, а транспортна - до 25 км/год. Привід роторів здійснюється від гідромоторів, а силова установка представлена шестициліндровим турбодизелем потужністю 209 кВт.

Головними перевагами технологій із застосуванням самохідних ворушилок є висока продуктивність, що може досягати до 6800 т/год, а також можливість формування буртів зі значним поперечним перерізом і висотою до 3,5 м, що забезпечує ефективне використання площі майданчика.

До недоліків таких рішень належать високі капітальні витрати на облаштування майданчиків із твердим покриттям, значна матеріаломісткість техніки та її вузька спеціалізація.

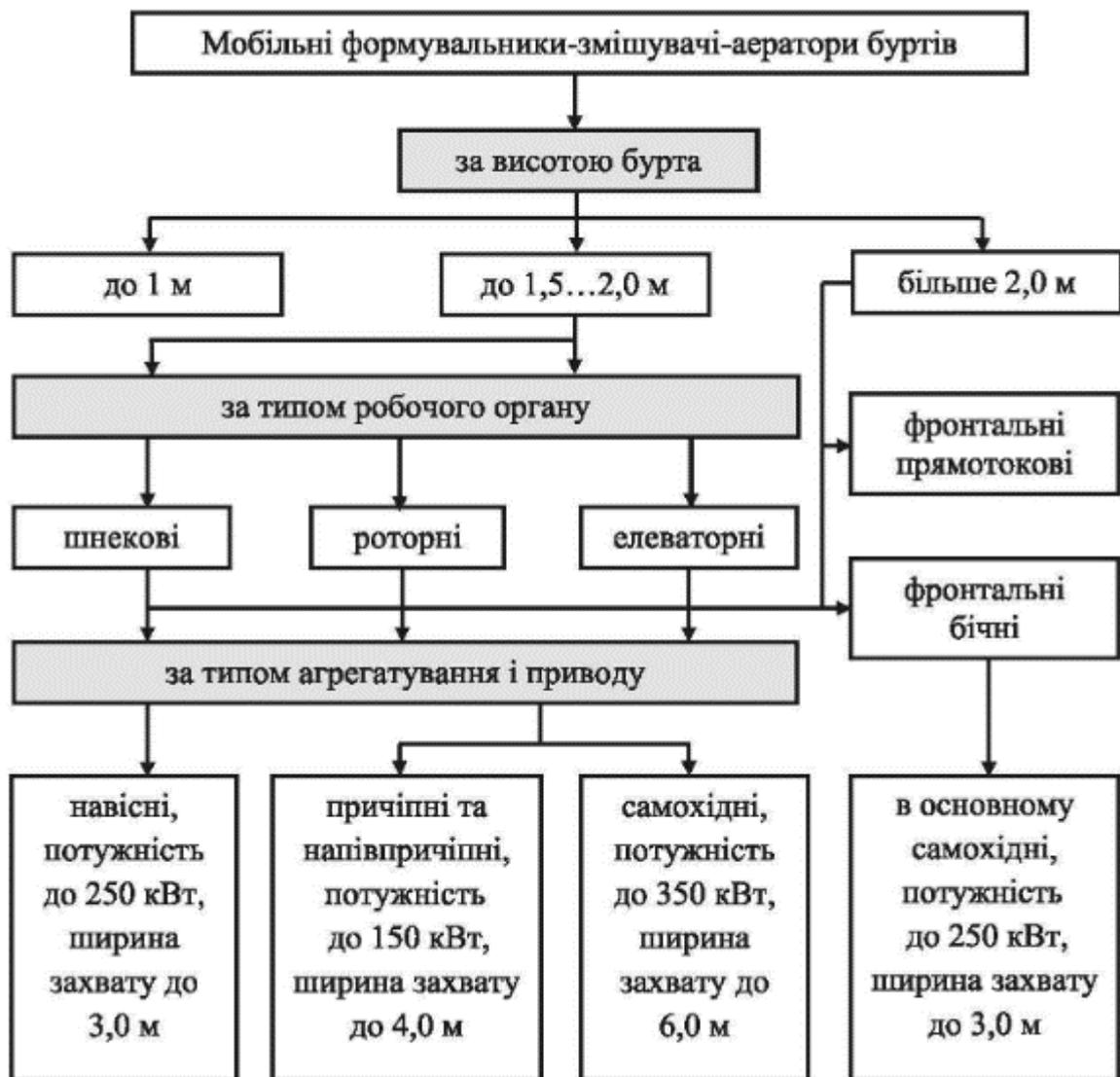


Рис.1.6 – Розподіл по класифікації мобільних аераторів-змішувачів

На практиці найбільш поширеними є аератори-змішувачі. Їх основне призначення – розпушування раніше сформованих буртів компосту чи іншої сировини. Отже при формування й аерації їх варто розглядати як процеси переміщення компосту в площині та просторі, в результаті чого маємо фізичну форму бурта, що є раціональною для перебігу всередині них хімічних та

фізичних процесів на основі змішування, а також звільняється вуглець оксид, а компост насичується киснем. На рис.1.6 наведемо типову класифікацію аераторів змішувачів.

### 1.3 Огляд наукових досліджень

#### 1.3.1 Аналіз патентів

Патент UA148110U «Змішувач-аератор компосту» [7]

Основною метою корисної моделі є підвищення якості формування компостного бурта та раціональне використання ширини захвату машини з урахуванням кута природного відкосу матеріалу. Це досягається завдяки застосуванню додаткового фрезерного барабана, ширина захвату якого становить 0,3–1,0 ширини основного барабана, а робоча поверхня оснащена спіральною стрічкою. Схематичний вигляд представлений на рис.1.7.

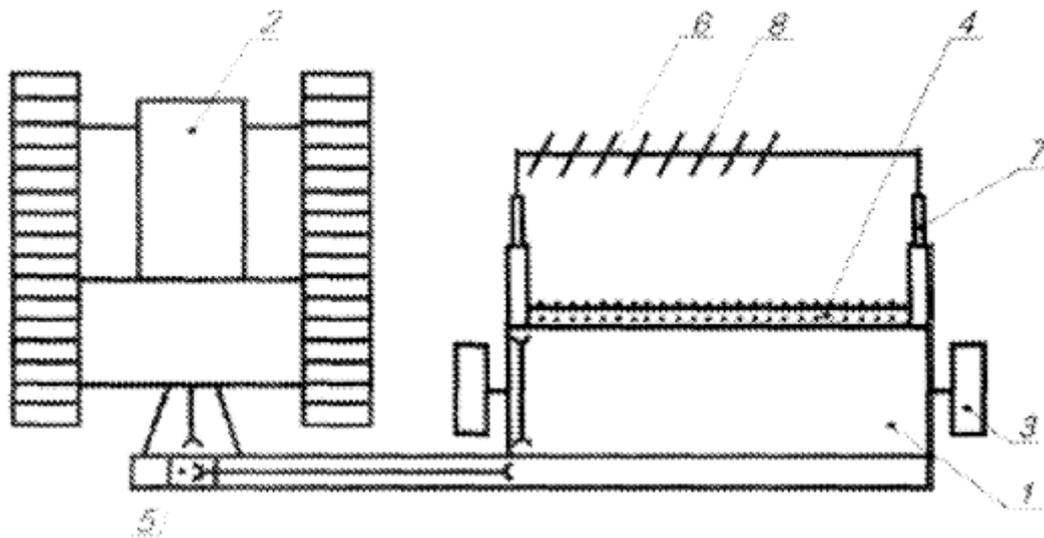


Рис. 1.7 – Схематичне зображення аератора: 1 – рама; 2 – енергетичний засіб; 3 – опорні колеса; 4 – основний фрезерний обертальний барабан; 5 – редуктор приводу; 6 – додатковий фрезерний барабан; 7 – телескопічна штанга для регулювання висота та вильоту; 8 – спіральна стрічка на додатковому барабані.

Пристрій складається з рами з опорними колесами, основного фрезерного барабана з ножовими лопатями та приводу від енергетичного засобу. Конструкція рами дозволяє регулювати кліренс між робочими органами та поверхнею. На ній також розміщено додатковий фрезерний барабан, встановлений на телескопічній штанзі з можливістю регулювання висоти й вильоту відносно основного барабана.

Додатковий барабан виконує попереднє зняття та зміщення верхніх шарів компостної маси, формуючи потрібний профіль бурта. Основний обертальний барабан подрібнює та перекидає матеріал, утворюючи новий бурт позаду машини. Робота змішувача-аератора здійснюється в русі вздовж бурта після підключення приводу через ВВП.

Ця конструкція забезпечує кращу геометрію бурта та ефективніше використання робочої ширини порівняно з відомими аналогами. Наявність додаткового барабана зі спіральною стрічкою є ключовою ознакою, що забезпечує досягнення вищого технічного результату. Корисна модель є відтвореною та може застосовуватися як змішувач-аератор компосту в умовах різних господарств.

Патент US3369797A «*Compost turner and windrow forming machine*» [7]

Машина для перевертання компосту (рис.1.8) та формування валків за патентом US3369797A являє собою самохідний агрегат, змонтований на трубчастій рамі 15, що спирається на передні приводні колеса 16 та задні керовані колеса 17. На горизонтальній частині рами розміщено силову установку 18, кабінку оператора 19, гідравлічну систему 20 та гідравлічний трансмісійний вузол 21, який забезпечує незалежне регулювання швидкості руху машини. Передня частина рами обладнана вертикальними стійками 22, на яких закріплено опорні вузли 40, що несуть циліндричний обертовий барабан 38. Привід барабана здійснюється від двигуна через зчеплення 34, ланцюгові зірочки 35, 37 та ланцюг 36. Вертикальне положення барабана регулюється гідравлічним циліндром 42, який дає можливість піднімати або опускати вузол 40 разом із барабаном. По периферії барабана розташовані радіальні зубці 44 та лопаті 46, встановлені спірально від кінців до середини, завдяки чому він працює як шнек, спрямовуючи компост до центру.

Над барабаном змонтовано металевий екран 49 із боковими стінками 50, що утворюють канал переміщення матеріалу. До опорного вузла 40 шарнірно кріпляться передні крила 51 та задні крила 56, які регулюються гідроциліндрами

55 і 59 відповідно. Передні крила формують завантажувальну горловину, а задні - вивантажувальну; зміна їхнього кута дозволяє керувати шириною та профілем валка.

Принцип роботи машини базується на взаємодії цих вузлів. Перед початком роботи крила 51 і 56, а також барабан 38 опускають до рівня ґрунту за допомогою циліндра 42. Машину підводять до місця розвантаження самоскида або до початку вже сформованого бурта. Сировина, що падає між передніми крилами 51, потрапляє безпосередньо у зону дії барабана 38. Під час обертання барабан підхоплює компост зубцями 44, подрібнює, піднімає і завдяки спіральному розташуванню зубців спрямовує його до середини. Лопаті 46 забезпечують додаткове викидання матеріалу назад і вгору, у бік вивантажувальної горловини, утвореної задніми крилами 56 і екраном 49. Через цей канал матеріал відкладається у вигляді валка заданої ширини, яка встановлюється поворотом крил 56. Висота валка визначається швидкістю руху машини, що регулюється гідросистемою 21, а також положенням барабана 38.

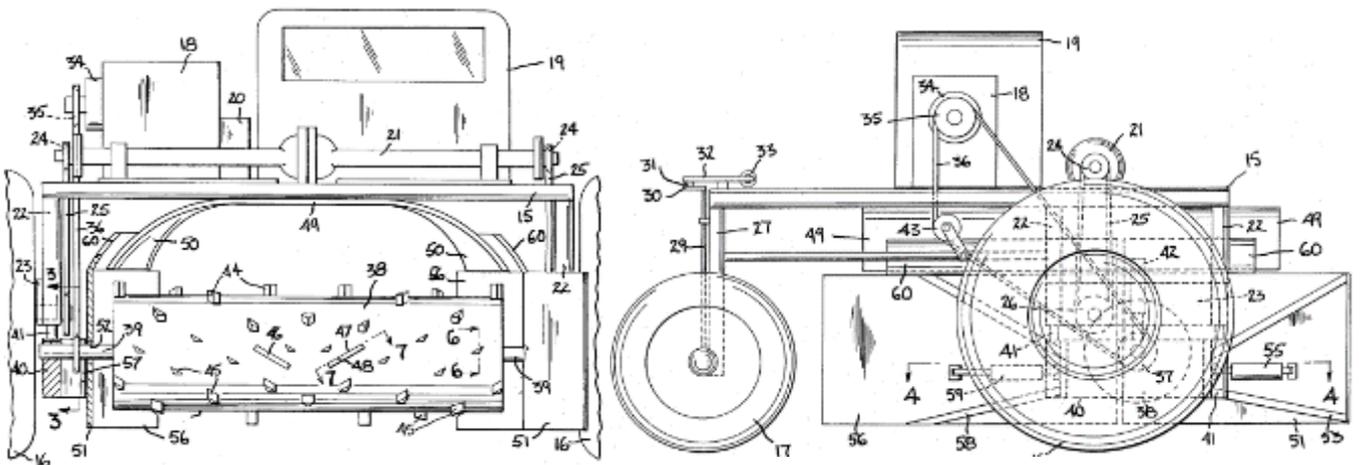


Рис.1.8 – Схема аератора згідно патенту: 15 – основна трубчаста рама машини; 16 – передні приводні колеса; 17 – задні керовані колеса; 18 – двигун внутрішнього згоряння; 19 – кабіна оператора; 20 – гідравлічна система (насос + резервуари); 21 – гідравлічна трансмісія / редуктор приводу ходових коліс; 22 – вертикальні стійки рами (опорні трубчасті колони); 23 – опорна плита, до якої закріплені передні колеса; 24 – ланцюгова зірочка трансмісії ходового приводу; 25 – приводний ланцюг (колісного ходу); 26 – зірочка на колесі 16; 27 – задні опорні стійки рами (для коліс 17); 28 – рульові кулаки задніх коліс; 29 –

вертикальний рульовий вал; 30 – кривошипні важелі рульового механізму; 31 – поздовжня тяга рульового керування; 32 – поворотний важіль рульового механізму; 33 – гідроциліндр керування поворотом задніх коліс; 34 – зчеплення двигуна; 35 – ведуча зірочка приводу барабана; 36 – приводний ланцюг барабана; 37 – велика зірочка на барабані; 38 – основний циліндричний обертовий барабан; 39 – осі / вали барабана; 40 – опорний підшипниковий блок барабана; 41 – напрямні стійки (телескопічні, у які входять стійки 22); 42 – гідроциліндр підйому/опускання барабана; 43 – натяжний шків (пружинний) приводного ланцюга; 44 – радіальні зубці (виступи) на барабані; 45 – викидні поверхні зубців (похилі); 46 – додаткові лопаті на барабані; 47 – ударні/викидні поверхні лопатей; 48 – ріжуча кромка лопаті; 49 – верхній захисний кожух (екран); 50 – бокові стінки кожуха; 51 – передні крила (завантажувальні щити); 52 – отвори для проходу валів 39 через крила 51; 53 – кронштейни кріплення передніх крил; 54 – шарніри передніх крил; 55 – гідроциліндри регулювання кута передніх крил; 56 – задні крила (вивантажувальні щити); 57 – шарніри задніх крил; 58 – кронштейни задніх крил; 59 – гідроциліндри регулювання кута задніх крил; 60 – внутрішні вигнуті крайки крил, що перекривають зазори з екраном; 61 – зона викидання матеріалу під час обертання барабана.

Під час подальшого дозрівання компосту машина знову розміщується над валком, охоплюючи його між крилами. Ті самі вузли - барабан 38, екран 49, крила 51 і 56 - забезпечують повторне інтенсивне змішування та перекладання матеріалу в новий, більш компактний і краще аерований валок. За необхідності гідроциліндр 42 піднімає барабан і крила для уникнення каменів або нерівностей, а також для переведення машини в транспортне положення. Для підтримання оптимальної вологості конструкція може бути доповнена системою подачі рідини, що дозволяє зволожувати або обробляти валок під час роботи.

Таким чином, завдяки комбінації обертового барабана 38 зі спіральними зубцями, регульованих крил 51, 56, верхнього екрана 49 та незалежного керування швидкостями переміщення і обертання, машина забезпечує високу

якість подрібнення, змішування й формування валків, що значно підвищує ефективність процесу компостування.

Патент US4478520A «*Compost turning and shredding apparatus*» [8]

Корисна модель належить до техніки переробки органічних відходів і стосується вдосконаленої системи шнеків, розміщених на машині для перевертання компосту та формування буртів. Як і звичайні компостні ворушилки, машина 10 рухається по землі над буртом і містить обертовий барабан 17, який підхоплює та перекидає компостну масу, прискорюючи її аерацію, окиснення та біологічне розкладання. На відміну від традиційних машин типу, де ширина барабана не завжди відповідає ширині фактичного бурта після кількох циклів ворущіння, у цьому винаході передбачено додаткову систему попереднього збирання матеріалу - шнеки 30 і 31, які встановлені попереду та по обидва боки барабана. Схема корисної моделі наведена на рис.1.9.

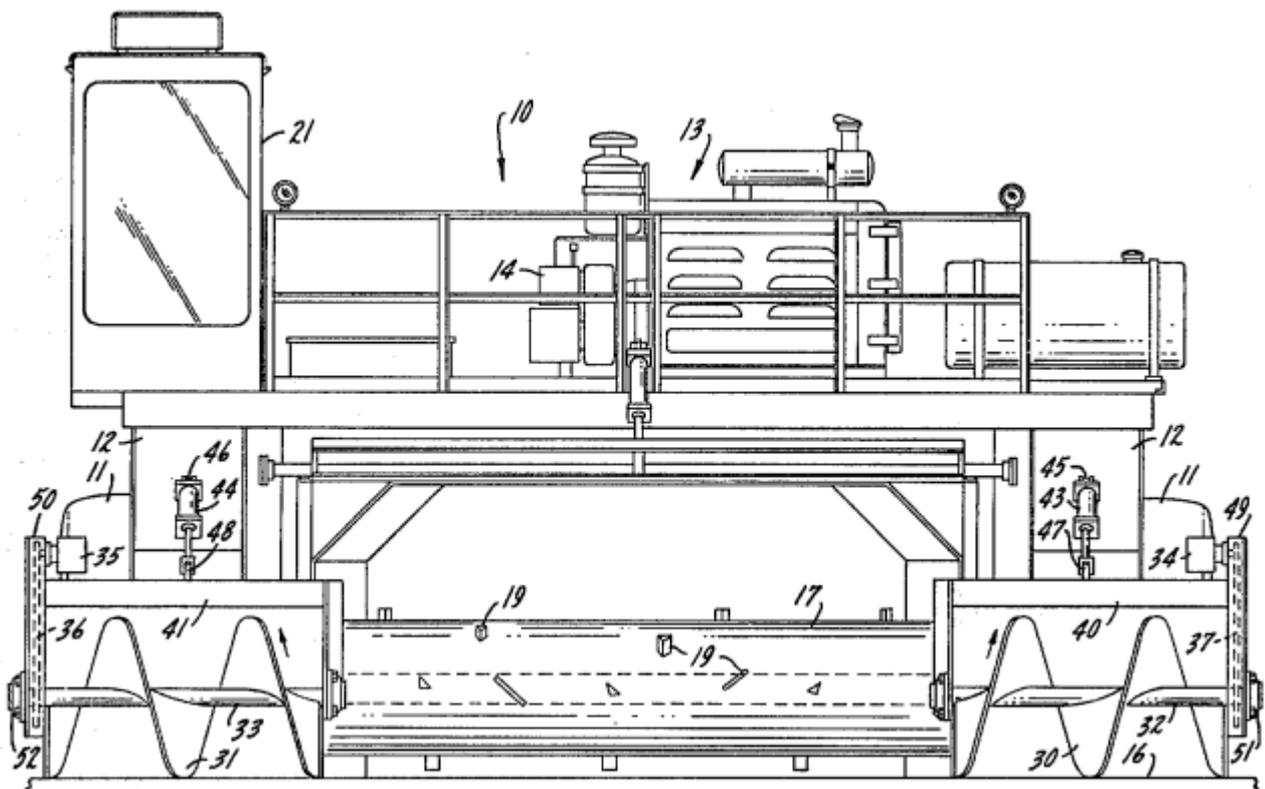


Рис.1.9 – Схема вдосконаленої машини згідно патенту US4478520A: 10 - компостоперевертальна машина; 11 - Привідні колеса машини; 12 - Рама машини; 13 - Силовий агрегат; 14 - Гідралічний насос і резервуарна система; 16 - Компостний майданчик; 17 - Обертовий барабан; 19 - Робочі лопатки; 21 -

Кабіна оператора; 30 - Лівий шнек для збирання компосту; 31 - Правий шнек для збирання компосту; 32 - Вал лівого шнека; 33 - Вал правого шнека; 34 - Гідромотор приводу лівого шнека; 35 - Гідромотор приводу правого шнека; 36 - Ланцюг приводу лівого шнека; 37 - Ланцюг приводу правого шнека; 40,41 - Лівий/правий кожух; 43,44 - Гідроциліндри піднімання/опускання лівого/правого кожуха; 45,46,47,48 - Шарніри кріплення гідроциліндрів; 49,50 - Ланцюгові кожухи лівого/правого шнека; 51,52 - Втулка/ступиця валу лівого/правого шнека.

Шнеки розташовані поперечно осі руху машини, на паралельних валах 32 і 33, і винесені вперед так, щоб вони першими зустрічали компостну масу, яка розсипалася за межі основного бурта. Кожен шнек має власний гідравлічний мотор 34, 35, привід здійснюється через ланцюги 36, 37. Машина комплектується гідравлічною системою 14, силовим агрегатом 13 і має привідні колеса 11 та задню керовану вісь 22 (послідовність елементів відповідає оригінальному опису). Шнеки не лише збирають розкиданий компост, але й укладають його прямо перед барабаном 17, забезпечуючи повне охоплення маси під час ворущіння.

Для захисту та додаткових технологічних функцій система доповнена кожухами 40 і 41, встановленими на шарнірах 42 і під'єднаними до гідроциліндрів 43, 44. Вони рухаються разом зі шнеками та виконують роль захисних крил, які перехоплюють вилітаючі фрагменти та одночасно очищують майданчик перед колесами 11, щоб ті не втрачали зчеплення. Механізм піднімання дозволяє відводити шнеки та кожухи вгору, забезпечуючи збільшений кліренс - це важливо при переміщенні машини без роботи або на нерівній поверхні.

У конструкцію додано герметичні кожухи 49 і 50, які закривають ланцюгові передачі шнеків і утворюють масляну ванну, забезпечуючи надійну та довговічну роботу приводу.

Під час роботи машина 10 рухається над буртом і приводиться в дію силовою установкою 13, яка через гідравлічну систему 14 забезпечує одночасно

приводні колеса 11 (через мотор 23 і ланцюг 24) та обертання барабана 17 (через мотор 25 і ланцюг 26). Компост, що лежить на майданчику 16, зазвичай розкидається ширше, ніж захоплює барабан 17, тому першими з матеріалом контактують шнеки 30 і 31, розташовані на валах 32 і 33 та під приводом моторів 34 і 35.

Обидва шнеки обертаються проти годинникової стрілки (при погляді з боку, показаного на фіг. 2), захоплюють розкидану масу та переміщують її до центральної частини бурта - у зону дії барабана 17. Оскільки вал 20 барабана розташований позаду та нижче шнеків, компост, що зібрали шнеки, одразу потрапляє в траєкторію ударів зубців 19. Барабан 17 підхоплює матеріал та викидає його назад і вгору, повністю перемішуючи масу.

Кожухи 40, 41, закріплені на шарнірах 42 і під'єднані до гідроциліндрів 43–48, працюють синхронно зі шнеками. Коли вони опущені, вони виконують дві функції: захищають від можливого розльоту твердих предметів і очищують майданчик перед колесами 11. Очищення зменшує сковзання коліс і стабілізує рух, що особливо важливо, оскільки привідні колеса знаходяться поза зоною дії барабана.

Герметичні ланцюгові кожухи 49 і 50 забезпечують постійне змащення приводу шнеків, запобігаючи потраплянню вологи та дрібних частинок компосту.

Головне технічне вдосконалення цього винаходу - введення двох незалежно керованих шнеків 30, 31, які розташовані попереду барабана та значно ширше охоплюють борт. Це дає змогу збирати весь розкиданий компост, формувати рівномірну лінію бурта і подавати матеріал до барабана 17 без втрат, що різко підвищує якість перемішування. Незалежний гідравлічний привід кожного шнека дозволяє регулювати їхню висоту, положення та швидкість роботи, що підвищує адаптивність машини до різних умов і різної ширини бортів.

Друге важливе вдосконалення - введення передніх і нижніх кожухів 40, 41, які очищують майданчик перед колесами 11. Завдяки цьому суттєво

збільшується тягове зусилля та стабільність руху, що було серйозною проблемою для попередніх моделей, де колеса рухалися по розкиданій компостній масі.

Третє вдосконалення - герметичні кожухи 49, 50 для ланцюгових передач шнеків. Вони створюють масляну ванну, зменшують зношування, підвищують надійність і знижують витрати на технічне обслуговування.

Загалом конструкція дозволяє підтримувати бурти в рівномірній формі, покращує якість перемішування компосту, прискорює процес біотермічного розкладання та робить роботу машини стабільною, ефективною і більш продуктивною.

Патент EP1230196B1 «*Machine for movement of compost heaps*» [9]

Винахід стосується машини, призначеної для роботи з великими компостними буртами під час бактеріальної ферментації. Мета конструкції - покращити аерацію матеріалу, прискорити ферментацію та забезпечити можливість безперервної роботи як у прямому, так і зворотному напрямках без втрати часу на переїзди та перестановку. Машина (рис.1.10) розрахована на обслуговування великих буртів висотою близько 3 м, шириною 20–30 м та довжиною понад 50 м, особливо у закритих приміщеннях, де важливо максимально використовувати доступний простір та не допустити зміщення бурта після обробки.

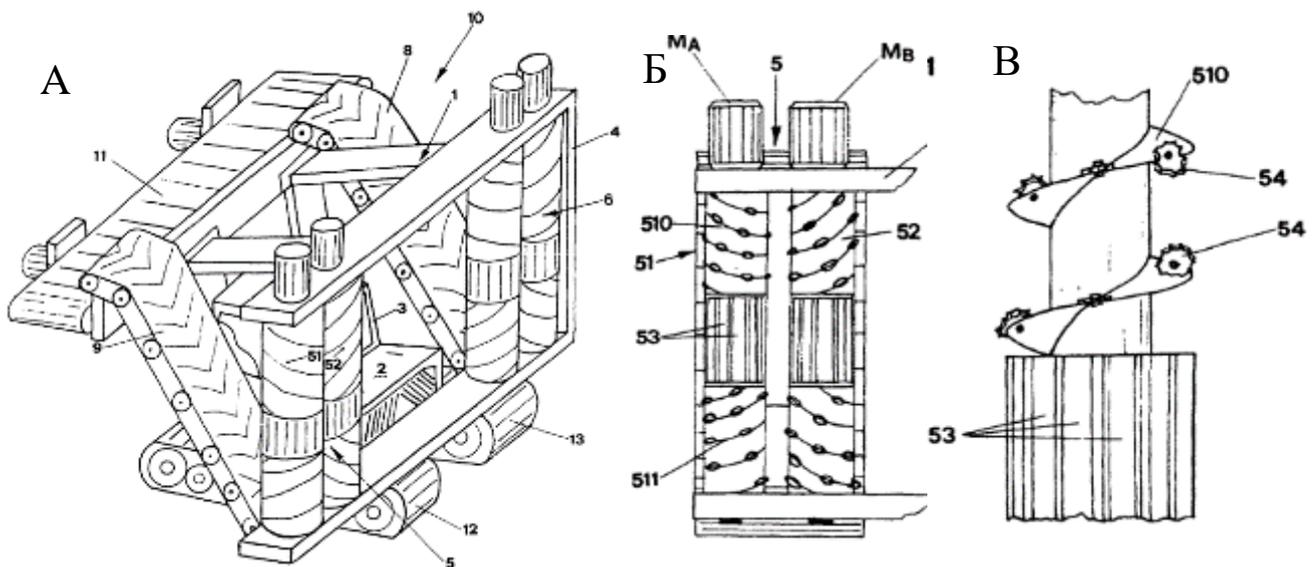


Рис.1.10 – А – загальний вигляд машини, Б – пара барабанів; В – один барабан:

1 - основна опорна рама машини; 2 - силова установка; 3 - місце оператора; 4 -

передня несуча рама; 5 - ліва пара шнеків; 8 - задній поздовжній транспортер; 11 - поперечний транспортер; 12, 13 - гусеничні рушії; 51, 52 - індивідуальні робочі шнеки; 53 - вертикальні виносні лопаті; 54 - ріжучі елементи; 510, 511 - спіралі шнека, намотані у протилежні сторони; Ма, Мб - гідравлічні мотори, що обертають шнеки.

Конструктивно машина складається з опорної рами 1, на якій змонтовано двигун внутрішнього згоряння 2, місце оператора 3, а також передню раму 4, що тримає два комплекти робочих органів - лівий гвинтовий блок 5 та правий гвинтовий блок 6. Кожен блок складається з двох контр-обертючих шнеків (наприклад, 5а і 5б), що працюють уздовж вертикальної осі й атакують компост по всій його висоті. За кожною парою шнеків розташовано збірні транспортери 8 і 9, які приймають зрізаний матеріал. Далі матеріал передається на поперечний стрічковий транспортер 11, який працює поперек руху машини та вивантажує компост на протилежний бік бурта, дозволяючи відтворити новий бурт поруч із первинним.

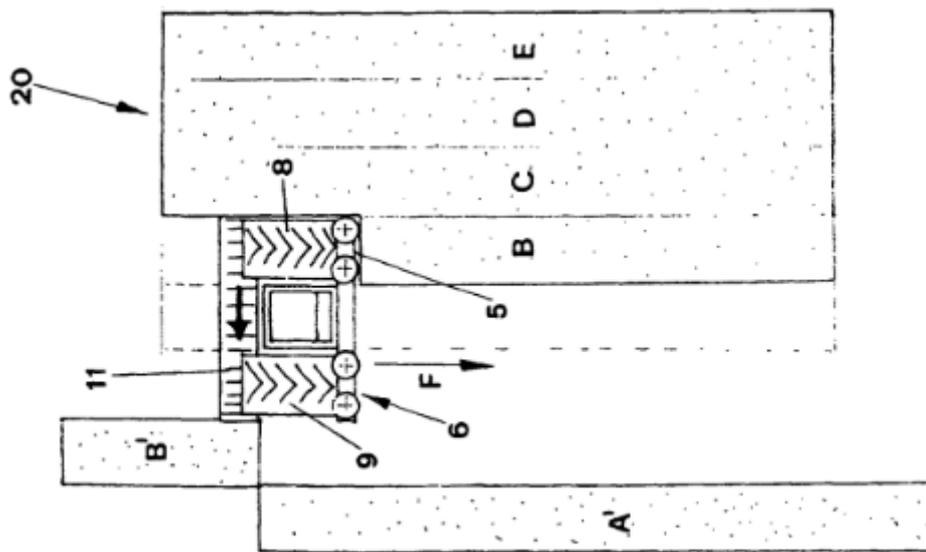


Рис.1.11 – Технологічна схема: 5,6 - ліва/права пара шнеків; 8,9 - задні поздовжні транспортери; 11 - поперечний транспортер; 20 - початковий компостний бурт; А, В, С, D, Е - послідовні секції бурта; А', В'- положення цих секцій після першого проходу.

Машина рухається на гусеницях 12 та 13, що забезпечує стабільну роботу на крутому або вологому компостному полі. Двигун 2 живить гідравлічну систему (гідроблок не показано), яка приводить у дію всі шнеки та конвеєри.

Основна особливість полягає в тому, що залежно від напрямку руху активується або ліва пара шнеків 5, або права пара 6. Така схема дозволяє вести роботу в обох напрямках без холостих проїздів.

Під час руху вперед машина атакує бурт правими шнеками 6, які починають зрізання та руйнування ділянки А бурта 20 (рис. 1.11). Обертаючись назустріч один одному, шнеки 6 переміщують матеріал углиб конструкції та передають його на транспортер 9, який, своєю чергою, подає компост на поперечний транспортер 11. Транспортер 11 транспортує матеріал убік та формує новий бурт А' позаду робочого органу.

Як показано на рис. 1.11, коли ділянка А повністю оброблена, машина виконує U-подібний розворот, після чого в зворотному русі активується ліва пара шнеків 5. Вони зрізають наступну ділянку В, а транспортер 8 передає матеріал на той самий транспортер 11, проте вже в протилежному напрямку руху стрічки. Поперечний конвеєр переносить матеріал на іншу сторону машини, формуючи бурт В'.

У результаті перших двох проходів початковий бурт зміщується на відстань, рівну глибині машини D, спочатку в один бік (бурт А'), а потім - у протилежний (бурт В'). Після обробки всіх зон (А, В, С, D, Е) бурт виявляється розтягнутим у вигляді серії сегментів А'–Е', як показано на рис. 7. Другий цикл обробки (машина знову проходить уздовж бурта) повертає матеріал у первісне положення, відновлюючи рівний паралелепіпедальний профіль.

Шнеки (наприклад, 51, 52) мають складну форму: два гвинтові витки 510 і 511, розмотані у протилежних напрямках. Виток 510 має більшу довжину, ніж 511, обидва обриваються трохи нижче осьової лінії, де встановлено вертикальні виносні лопаті 53, що скеровують матеріал на транспортер. По спіралях розміщено ріжучі ножі 54, які рівномірно зрізують матеріал з вертикального профілю бурта та покращують захоплення.

Після завершення обробки всі секції бурта повертаються на початкову лінію, що є критично важливим для роботи в закритих ангарах, де компост не повинен зміщуватися поза межі дозволеної зони.

Головним нововведенням є використання двох окремих пар вертикальних шнеків (ліва 5 і права 6) з можливістю незалежної активації залежно від напрямку руху. Завдяки цьому машина може працювати безперервно вперед і назад, усуваючи час на повернення в початкову точку та збільшуючи загальну продуктивність майже вдвічі. Подвійні контрбертові шнеки дозволяють обробляти всю висоту бурта та створюють рівномірний зріз по ширині. Розміщення лопатей 53 у зоні переходу витків спрямовує потік матеріалу безпосередньо на транспортер, покращуючи чистоту робочої зони та підвищуючи ефективність вивантаження.

Важливою інновацією є поперечний транспортер 11, що працює у двох напрямках і здатний формувати бурт зліва або справа від машини. Це дозволяє безперервно *juxtapose* (накладати) нові бурти один до одного без перекриття та без втрати простору. Система переміщення забезпечує точну реконструкцію профілю бурта після повторного проходу, що є критично важливим у замкнутих приміщеннях.

Завдяки конструкції шнеків із подвійними спіралями та ножами 54, машина забезпечує ефективне подрібнення та переміщення матеріалу, покращує аерацію, зменшує час ферментації та забезпечує рівномірний контакт матеріалу з повітрям. Розбірність передньої рами 4 дозволяє перевозити машину дорогами загального користування без перевищення допустимих габаритів.

Патент WO1990013527A1 «*Compost windrow turner*» [10]

Патент стосується машини для перелопачування та аерації компостних валків, яка працює в комбінації з трактором-тягачем. Винахід спрямований на ефективне змішування, подрібнення, аерацію та перенесення компостної маси з мінімальними затратами часу та високою продуктивністю.

Машина з цього патенту усуває ці проблеми завдяки одному нескінченному елеватору з зубами, який:

- піднімає матеріал з валка;
- переміщує вгору;

- викидає позаду машини;
- повністю змішує і аерує компост;
- може розрізати поліетиленові мішки і відділяти їх від вмісту.

Машина (рис.1.12) складається з одного головного елеватора 14, встановленого під кутом 35–45° до землі. На елеваторі розміщені горизонтальні планки 20, на яких закріплені зуби 30 - вони піднімають, подрібнюють та змішують компост. Зуби можуть бути прямими або чашоподібними.

Елеватор закріплений на рамі 16, яка включає верхні та нижні балки 18 і 38, а також рухомі вертикальні опори 36. На лівому боці встановлений балансирний міст 40 з колесами 42, які компенсують нерівності. На правому боці - пара коліс 44, керованих через систему важеля 54 і гідроциліндра 58, що дозволяє оператору піднімати та опускати елеватор, регулюючи його висоту.

Машина з'єднується з трактором через затискний механізм 66, який фіксує край ковша 12 між двома рядами зубців 84 і 88. Це дозволяє трактору штовхати машину та керувати її положенням.

Для роботи з мішками передбачена окрема система з барабаном 104 із ексцентричними штифтами 108, які захоплюють пластикові пакети, витягують їх з потоку компосту та відділяють.

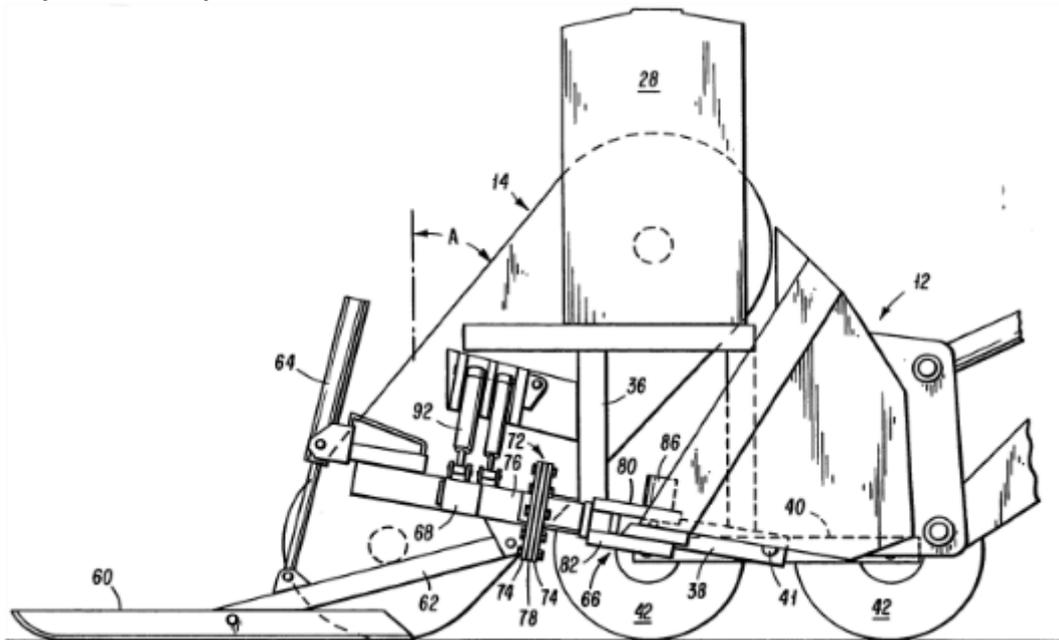


Рис.1.12 – Вигляд машини збоку: 12 - ковш трактора; 14 - елеватор; 28 - силовий агрегат машини; 32, 36 - вертикальні опори; 34, 38 - поперечні рами; 40 - балансирний міст; 42 - колесо; 60 - лижа проти заглиблення; 66 - затискач для

ковша; 68, 74, 78 - стабілізуючі пластини; 80 - плити затиску; 92 - гідроциліндри нахилу.

Трактор 10 підводить ківш 12 в затискний механізм 66. Гідроциліндри 86 зводять гріпери 84 та 88 і фіксують ківш у захваті. Машина рухається уздовж валка компосту 20. Елеватор 14 повертається за допомогою двигуна 28 через вал 24 та ланцюги 22. Планки 20 з зубами 30 захоплюють компост із землі. Завдяки оптимальному куту нахилу  $A = 35\text{--}45^\circ$  зуби 30 піднімають матеріал, перемішують, подрібнюють і пропускають через повітряний потік. Матеріал вивантажується у верхній точці елеватора. Його напрямок задають регульовані жалюзі 96, змінюючи ширину та форму валка. Завдяки колісним вузлам 42 і 44 елеватор 14 підтримує оптимальну висоту та не пошкоджує ґрунт під валком. Працюючи вздовж усього валка, машина створює новий, рівномірний і добре аерований валок позаду себе.

Загалом, машина забезпечує високу якість компосту, рівномірний валок, хорошу аерацію, а також працює швидше й дешевше, ніж попередні моделі.

### 1.3.2 Аналіз наукових статей

Стаття *«Вплив технологічних факторів на процеси компостування»*  
Павленко С.І. (Україна) [11]

Дослідження проводились на чотирьох буртах рис.1.12.

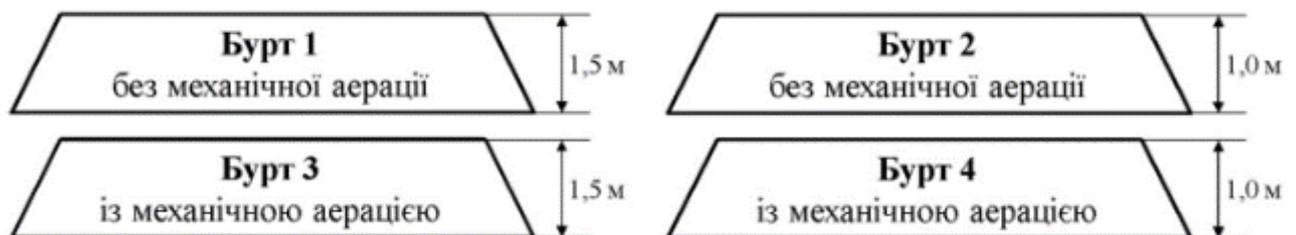


Рис.1.12 – Схеми закладання буртів з описом

Формування буртів здійснювалось модернізованим розкидачем ПРТ-10. Подальші аерації виконувались навантажувачем Т-156 у поєднанні з ПРТ-10, а зволоження проводили для приведення суміші до оптимальної вологості за допомогою автоцистерни ГАЗ-53 (4 м<sup>3</sup>) через розпилювальний пристрій.

Інтервали аерацій для буртів 3 і 4 наведено на рис. 1.13. Період досліджень – 29.04–03.06.2017.



Рис.1.13 – Часовий інтервал проведення досліджень поділений на операції

Хімічні аналізи (NPK, зола, органічна речовина, вуглець, загальний та амонійний азот, співвідношення C:N) проводили за стандартами ГОСТ у лабораторії «Держгрунтоохорони».

Температурний режим контролювали електронним термометром ТМ-32/Н-5Т з датчиками DS18B20. Дані знімали кожні 10 хвилин упродовж усього циклу компостування.

У всіх випадках спостерігалось зростання загального та аміачного азоту, але в оброблених буртах (3 і 4) цей процес був значно інтенсивнішим:

- загальний азот збільшився до 4,0–4,5% проти 2,5–2,7% у необроблених;
- аміачний азот – до 1,93% проти 1,07%.

Після аерації та зволоження зростання рухомих фосфатів було суттєвим:

- у бурті 1 м висоти – збільшення адитивної складової в 1,67 раза;
- у бурті 1,5 м – практично такий самий рівень;
- інтенсивність накопичення фосфатів у високому бурті зростала в 3,5 раза.

Оптимальний строк компостування, враховуючи фазові переходи фосфатів, становить  $\approx 25$  діб.

Динаміка рухомого калію також була нелінійною. Після аерації:

- у бурті 1 м – зростання вмісту в 1,63 раза,
- у бурті 1,5 м – у 1,7 раза.

Накопичення калію проходило інтенсивніше в метровому бурті (в 2,75 раза), а швидкість зв'язування нерозчинних форм також вища саме в бурті 1 м.

Механічне перелопачування забезпечило швидкий термофільний розігрів:

— у буртах 1,5 м – до 65–71°C на 2–3 добу,

— у буртах 1 м – до 50–58°C.

Через 15–17 діб температура опускалася до  $\approx 50^\circ\text{C}$ , переходячи з термофільної у мезофільну зону. До 36 доби:

— бургт 1 – 39–45°C (до 30°C у нижніх шарах),

— бургт 2 – на 5–8°C нижче.

У бурті 3 (з аерацією й водою) температура утримувалась у межах 61–65°C, а без додавання води тимчасово досягала 70–72°C. У бурті 4 значення були стабільно на 5–10°C нижчими, але реакція на зовнішні температури була незначною.

Отже механізована аерація та регульоване зволоження суттєво покращують перебіг компостування, активізують мікробіологічні процеси, підвищують вміст доступних форм NPK, прискорюють перехід поживних елементів у рухомі форми, забезпечують якісний термофільний режим, знижують масу компосту за рахунок окислення вуглецю, покращуючи логістику та ефективність внесення добрив.

Стаття *«Performance Evaluation of Compost of Windrow Turner Machine Using Agriculture Waste Materials»* Sarfraz Hashim, Rehan Bashir (Пакистан) [12]

Місто Мултан (Пакистан) стало майданчиком для дослідів з механізованого компостування (рис.1.13). Досліди проводили на полігоні твердих побутових відходів університету MNSUAM, поруч із факультетом, що спрощувало контроль процесу. Для компосту використовували «зелену» фракцію (рослинні рештки з території університету) та «коричневу» – сухе листя, гілки, солому, папір, деревну тріску, підтримуючи оптимальне співвідношення C:N і вологість.

Система компостування – вітрові бурти (windrow composting). Сформували дві однакові купи довжиною до 15 м (50 ft), шириною 2,4 м та висотою 1,2 м (8×4 ft). Першу (бургт 1) щотижня перевертали компостним аератором-змішувачем, другу (бургт 2) – вручну. Використаний агрегат мав ротор діаметром 170 мм і довжиною 2970 мм із 38 лопатками та баком на 500 л з 12 форсунками для

зрошення – це дозволяло одночасно перемішувати й зволожувати суміш. Додатково вносили меляси для активізації мікрофлори.

Мікроорганізми, розкладаючи органічну масу, виділяють тепло,  $\text{CO}_2$  та водяну пару, тому стежили за основними параметрами:

- температура (термопари на глибині 0,6 м, вимірювання кожні 2 тижні; санітарний мінімум  $62\text{ }^\circ\text{C}$ ),
- рН (5,5–9,0),
- вологість (40–65 %),
- електропровідність (ЕС),
- катіонообмінна ємність (СЕС),
- співвідношення C/N та вміст мікроелементів (Fe, Mn, Zn, Cu).

СЕС визначали титруванням після обробки проб  $\text{Ba}(\text{OAc})_2$ , ЕС – у витяжці 1:2,5, статистичний аналіз робили в SPSS (SD, t-тест при  $\alpha = 0,05$ ).



Рис.1.13 – Фото проведення дослідів

У висновку до статті зазначається, що бургт 1 (механічне перелопачування) дав 13 768 кг компосту, бургт 2 (ручне) – 11 512 кг. Механізований обробіток підвищив вихід приблизно на 19,5 %, що пов'язано з більш оптимальним температурним режимом та повнотою розкладання.

В обох буртах температура проходила мезофільну, термофільну, охолоджувальну та стадію дозрівання. У бурті 1 температура зросла з  $\sim 36$  °C до максимуму близько  $62\text{--}65$  °C і потім поступово знизилася до  $\sim 38\text{--}40$  °C до 60-го дня, що відповідає ефективному, але безпечному термофільному режиму. У бурті 2 температура піднімалася до  $72\text{--}74$  °C і довше трималась на дуже високому рівні, що вже пригнічує корисну мікрофлору та призводить до втрат азоту. Статистичний аналіз (t-тест) показав значущу різницю між температурними профілями двох буртів.

СЕС (катионообмінна ємність) є індикатором зрілості та здатності компосту утримувати поживні елементи. У бурті 2 (ручне перевертання) СЕС зросла з 21,23 до 33,28 meq/100 g, що нижче порогового значення зрілості ( $\approx 60$  meq/100 g). У бурті 1 СЕС підвищилася з 21,23 до 68,87 meq/100 g, що свідчить про сформований гумус і зрілий компост. Різниця між буртами статистично значуща.

Електропровідність (ЕС) відображає сумарну кількість розчинних солей:

- у бурті 1 ЕС зросла з 1,98 до 11,34 dS/m;
- у бурті 2 – з 1,98 до 7,86 dS/m.

Хоча t-тест не показав статистично значущої різниці, помітно, що машина забезпечила швидше мінералізування й насичення компосту поживними йонами. При цьому важливо контролювати, щоб ЕС не була надто високою для вимог конкретних культур.

У процесі компостування С зменшується (вигорання у вигляді  $\text{CO}_2$ ), азот концентрується – C/N звужується. Через 8 тижнів бурт 2 мав  $\text{C/N} \approx 18,9$  – прийнятний, але ближчий до верхньої межі норми. Бурт 1 досяг  $\text{C/N} \approx 15,1$ , що вважається оптимальним діапазоном зрілого компосту (15–20:1).

У механізованому бурті 1 вміст Mn, Cu, Zn, Fe зріс значно сильніше, ніж у ручному бурті, наприклад:

- Mn: від 33 до 214 ppm,
- Zn: від 53 до 198 ppm,
- Fe: від 113 до 596 ppm.

Це свідчить про інтенсивніше вивільнення та накопичення мікроелементів у доступній формі, що покращує агрохімічну цінність компосту.

Можна зробити висновок, що механізоване компостування з використанням аератора компосту забезпечило кращу аерацію, контроль вологості та температури, ніж ручне перевертання. З погляду агрономії, компост з бурту 1 є більш зрілим, багатшим на доступні поживні речовини та мікроелементи, а отже, краще підходить для підвищення родючості ґрунту. Загалом дослідження підтверджує, що аератора компосту (windrow turner) суттєво підвищує ефективність, швидкість і якість компостування порівняно з традиційним ручним перевертанням і є перспективним напрямом механізованого перероблення органічних відходів.

*Стаття «Обґрунтування раціональних варіантів застосування технічних засобів приготування компостної суміші» Павленко С.І. (Україна) [13]*

Механізоване компостування дає змогу ефективно переробляти органічні відходи та отримувати якісні добрива, однак існуючі технічні засоби мають обмеження й потребують удосконалення. Машини періодичної дії (навантажувачі, бульдозери, розкидачі) забезпечують потрібну висоту й ширину буртів, але дають мало контролю за якістю суміші й режимом ферментації та мають високі витрати. Навантажувачі неперервної дії продуктивніші, проте складні й енергоємні. Найперспективнішими визнані мобільні роторно-барабанні аератори-змішувачі: вони простіші за конструкцією й продуктивні, але вимагають точного узгодження висоти бурту та режимів роботи.

Аналіз показав, що найбільш ефективними є барабанно-лопатеві робочі органи, однак їх вплив на висоту сформованого бурту, однорідність суміші, структурність, енергоємність та температурний режим досліджений недостатньо. Відсутні також практичні рекомендації щодо вибору частоти обертання, швидкості переміщення та геометрії лопатей. Це зумовило мету роботи – підвищити ефективність виробництва компостів шляхом розробки й

обґрунтування конструктивно-технологічних рішень для прискореної аеробної ферментації.

Для цього досліджено чотири схеми роботи (рис.1.14) роторних барабанно-лопатевих пристроїв (одно- та двобарабанний аератор і ПРТ-10) з варіюванням діаметра барабанів, кута та форми лопатей (Л- і М-подібні), взаємного розташування барабанів, частот обертання ( $n_1$ ,  $n_2$ ), швидкості подачі  $V$  та висоти вихідного бурту  $H$ . Як критерії оцінювали: висоту сформованого бурту  $H'$ , коефіцієнт варіації змішування  $\delta$ , структурність  $\theta$ , дальність і висоту вильоту часток, а також споживану потужність  $P$ . Фізико-математичне моделювання встановило зв'язок між конструктивно-кінематичними параметрами та масою зрізуваної стружки, висотою бурту й однорідністю суміші; показано, що збільшення кінематичного показника (частоти обертання) при незмінних розмірах барабана зменшує масу компосту на лопаті майже вдвічі, а взаємне розташування барабанів істотно впливає на формування бурту.

Експерименти дали змогу відібрати раціональні параметри. Для пристрою на базі ПРТ-10 оптимальним виявився (одно)двобарабанний Л-подібний робочий орган з частотою обертання 460 об/хв: досягається висока однорідність суміші ( $\delta \approx 0,98$ ), структурність  $\theta \approx 90\%$  при невеликій потужності 8,4–8,7 кВт. Для двобарабанних схем за компромісного вибору режимів ( $n_1 \approx 320$  об/хв,  $n_2 \approx 170$ –180 об/хв,  $V \approx 0,05$  м/с) однорідність становила  $\delta \approx 0,71$ –0,88 при прийнятних витратах енергії. Порівняння Л- і М-подібних розташувань лопатей показало: М-подібне дає кращу якість змішування, але потребує більшої потужності; Л-подібне – енергоекономічніше. Двобарабанні органи забезпечують кращу однорідність і

структурність бурту, проте більш енергоємні, тоді як однобарабанні краще «формують» бурт і забезпечують більшу дальність вильоту часток.

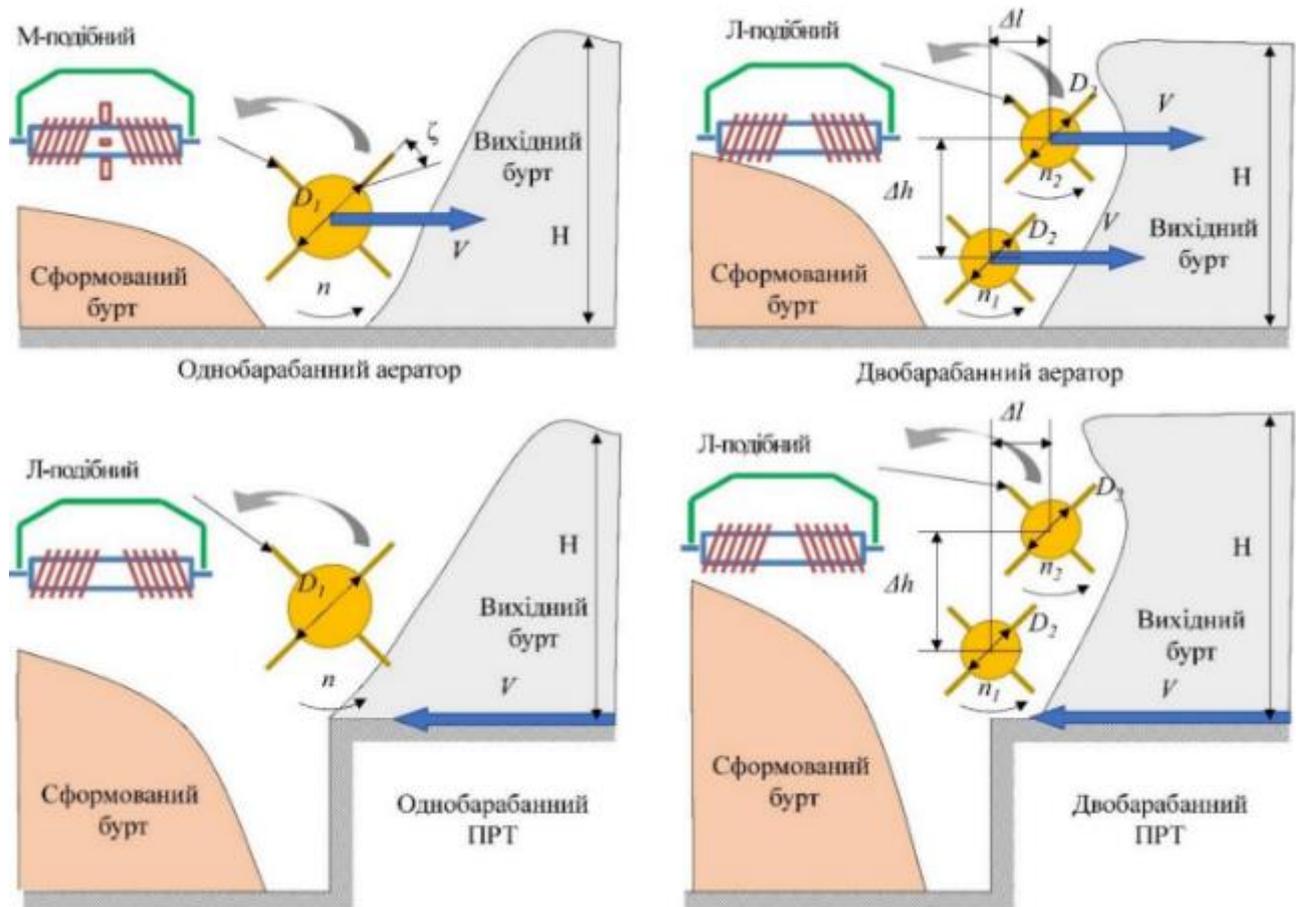


Рис.1.14 – Схеми проведених дослідів описаних в статті

На основі комплексної оцінки запропоновано практичні рекомендації.

- Для курячого підстилкового посліду на лущинні соняшнику за обсягу менше 2123 т доцільно використовувати ПРТ-10 з одним Л-подібним барабаном; при більших обсягах – аератор із двома Л-подібними барабанами.
- Для соломистого гною ВРХ за малих обсягів рекомендовано ПРТ-10 з двома Л-подібними барабанами, за великих – аератор з одним М-подібним барабаном.

Таким чином, дослідження показали, що правильно підібрана схема й параметри барабанно-лопатевого робочого органу дозволяють істотно підвищити однорідність і структурність компостної суміші при мінімальних енерговитратах, а отже роблять механізоване компостування більш економічним і придатним до широкого впровадження в агроєкосистемах.

## 1.4 Висновок до розділу

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасних технологій та технічних засобів аерації компостних мас, включаючи методи обробки підстилкового гною, огляд існуючих конструкцій аераторів та аналіз світових наукових і патентних розробок. Розглянуто діючі технологічні схеми виробництва компосту, їх сильні та слабкі сторони, а також технічні рішення, що застосовуються для механізованого формування й аерації буртів.

У ході аналізу встановлено, що галузь механізованого компостування активно розвивається та тяжіє до використання машин із роторно-барабанными робочими органами, які забезпечують високу продуктивність, інтенсивне перемішування та покращене насичення повітрям. Патентні джерела демонструють тенденцію до комбінування роторів, шнекових систем, регульованих крил, транспортерів і змішаних схем руху матеріалу. Основною метою таких удосконалень є підвищення однорідності суміші, продуктивності, точності формування буртів та зниження енерговитрат.

Наукові статті свідчать про безсумнівний позитивний вплив механізованої аерації на температурний режим, вологість, швидкість розкладання, хімічний склад та загальну зрілість компосту. Механізовані методи аерації забезпечують підвищення СЕС, збільшення вмісту мікроелементів, прискорення переходу фосфатів та калію в рухомі форми, стабільніший термофільний режим та підвищення кінцевого виходу компосту на 15–25 % порівняно з ручним або маломеханізованим перемішуванням.

Проведений порівняльний огляд існуючих технічних засобів показав, що:

- машини періодичної дії (навантажувачі, бульдозери, ПРТ) забезпечують формування бурту, але не дають стабільних показників однорідності суміші та рівномірності аерації;
- машини неперервної дії є продуктивними, але мають складну конструкцію та високі енерговитрати;

— мобільні роторно-барабанні аератори мають найкращу продуктивність, проте потребують вдосконалення в частині оптимізації параметрів робочих органів.

Попри значний обсяг досліджень, виявлено низку невирішених науково-технічних задач, які й визначають актуальність обраного напрямку дослідження:

- Недостатньо вивчені закономірності впливу геометрії лопатей та їх розташування на робочому барабані на показники структурності бурту, висоту сформованої призми та енерговитрати.
- Відсутні узагальнені моделі, що описують взаємозв'язок між частотою обертання барабана, швидкістю переміщення агрегату та однорідністю компостної суміші.
- Не досліджено формування бурту при різних схемах взаємного розташування двох барабанів (за висотою та за горизонтальною зміщеною).
- Недостатньо даних про пошаровий розподіл температур та об'ємної маси під дією роторно-барабанних робочих органів.
- Немає дослідження вплив кінематичних параметрів, кутів лопаток.
- Погано досліджений вплив густини компостної суміші.
- Потребує подальшого вивчення питання енергоефективності, особливо при роботі двобарабанних систем у порівнянні з однобарабанними.

Таким чином, перший розділ підтверджує те, що є великий простір для подальших досліджень та розробки нового або вдосконаленого роторно-барабанного робочого органу з оптимізованими параметрами.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Схема установки

Обрана установка для прискореного біотермічного компостування гною являє собою причіпний змішувач-аератор, конструкція якого забезпечує одночасне розпушування, аерацію, формування буртів та зволоження компостної маси. Установка агрегується з трактором тягового класу 1,4 та приводиться в дію від валу відбору потужності.

Основою агрегату (рис.2.1) є рама 1, на якій змонтовані всі функціональні вузли. Рама виконана просторовою, забезпечує жорсткість конструкції та містить механізми регулювання кліренсу. До рами приєднані опорні колеса 3, положення яких корегується за допомогою гідродомкрата 13, що дозволяє встановлювати робочу висоту барабана відносно землі залежно від рельєфу та висоти бурта.

Головним робочим органом є фрезерний барабан 4, оснащений системою робочих елементів двох типів. Центральна зона барабана містить плоскі тангенціальні лопаті 5, встановлені таким чином, щоб перекидати масу за барабан, формуючи рівномірний бурт. Бокові ділянки барабана оснащені радіальними лопатями 6, розташованими уздовж зустрічних спіральних ліній з кутом атаки 20...45°. Таке поєднання забезпечує:

- інтенсивне перемішування;
- руйнування злежаних фракцій;
- транспортування маси до центра барабана;
- ефективне насичення компосту повітрям.

Барабан 4 отримує обертання від джерела енергії 2 через редуктор 12, який забезпечує необхідний діапазон частот обертання, що є ключовими параметрами технологічного процесу компостування.

Установка оснащена системою зволоження та інокуляції, яка включає:

- контейнер 7 для робочої рідини (вода, поживні розчини, мікробіологічні закваски);
- розпилювачі 8, розташовані по контуру конструкції над робочою зоною барабана;

- дозатор 9, що визначає витрату рідини;
- насос 10, синхронізований зі швидкістю обертання барабана;
- фільтр 11 для очищення рідини.

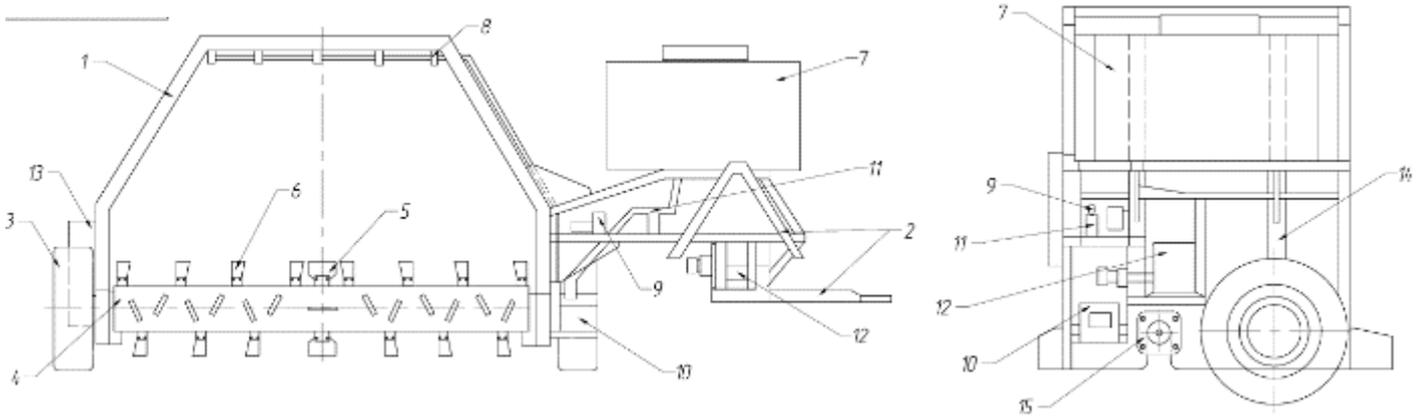


Рис.2.1 – Загальний вигляд аератора: 1 – рама; 2 – начіпний пристрій; 3 – опорні колеса; 4 – фрезерний барабан; 5 – подвійна лопать; 6 – лопать; 7 – ємність для рідини; 8 – розпилювач; 9 – розподільник; 10 – насос; 11 – фільтр; 12 – редуктор; 13 – гідродомкрат; 14 – гвинтовий вал; 15 – кришка підшипника.

Система зволоження забезпечує рівномірне внесення рідини безпосередньо під час перемішування, коли компост максимально розпушений. Це підсилює біотермічний ефект і прискорює ферментацію.

Регулювання робочої відстані між лопатями барабана та ґрунтом здійснюється через гвинтові вали 14, що дозволяє адаптувати агрегат до різної густини та структурності гною, а також до бажаної висоти формованого бурта.

Процес роботи здійснюється таким чином: агрегат, рухаючись уздовж компостної купи, підбирає матеріал боковими лопатями 6, транспортує його всередину барабана, де центральні лопаті 5 викидають компост за агрегат, одночасно подрібнюючи та аеруючи його. При необхідності активується система зволоження, що подає рідину крізь розпилювачі 8 безпосередньо в оброблювану масу.

Конструкція дозволяє виконувати технологічний процес при швидкості руху 0,48–0,55 м/с, що відповідає можливостям тракторів МТЗ-82 та подібних машин. Завдяки оптимізованому розташуванню робочих лопатей та можливості

регулювання кліренсу, установка формує бурти висотою до 1,5...2,0 м та забезпечує інтенсивну аерацію компостної суміші.

Загалом конструкція змішувача-аератора поєднує:

- ефективний фрезерний робочий орган;
- адаптивну раму з регульованою висотою;
- систему зволоження та інокуляції;
- можливість роботи на різних видах гною та компостних сумішей;
- технологічну сумісність із стандартними тракторами.

Це забезпечує високу продуктивність, рівномірність перемішування та стабільні умови для прискореного біотермічного компостування.

## **2.2 Методи досліджень та обробки інформації**

### **2.2.1 Проведення чисельного моделювання**

Дослідження проведено в ПЗ StarSSM+. Дослідження буде проводитись згідно рекомендацій [14] та [15]. Для початку необхідно створити тривимірну модель барабану у відповідному масштабі. Для тривимірного моделювання використовуємо Autodesk Inventor.

Барабан є циліндром, тож створюємо коло радіусом 50мм та витягуємо його на 490 мм, утворивши таким чином циліндр. Барабан це симетрична конструкція, тобто для розрахунку нам достатньо виконати лише половину моделі. За допомогою інструмента «спіраль» на лівій половині барабану створюємо спіраль з 6 витками. На спіралі створюємо лопать, далі за допомогою масиву робимо ще 12 лопатей вздовж спіралі. По центру барабану створюємо чотири центральні лопаті. Модель яка вийшла показана на рис.2.1. Для економії ресурсів в досліді буде задіяна лише половина барабану. Для іншої половина дані будуть симетричні.

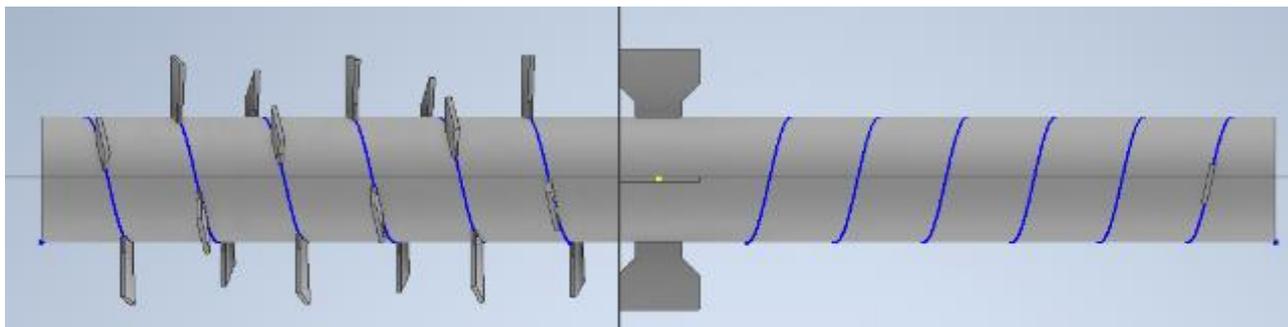


Рис.2.1 – Тривимірний модель барабану

Далі необхідно створити робочу область. В якості робочої області використовуємо прямокутник зі сторонами 4,5x1,5x1,25 м. Робимо нахил рамки, вирізаючи область в 1м під кутом. Завантажуємо барабан та вирізаємо його половину по осі симетрії. Вставляємо барабан в прямокутник та використовуємо інструмент «Булеве вирізання». Модель яка вийшла покажемо на рис.2.2.



Рис.2.2 – Робоча область розрахунку

Створюємо границі, а потім сітку. Для сітки обираємо параметри «Surface Remesher» та «Polyhedral Mesher», розмір сітки приймаємо 0,025м. Результат показано на рис.2.3.

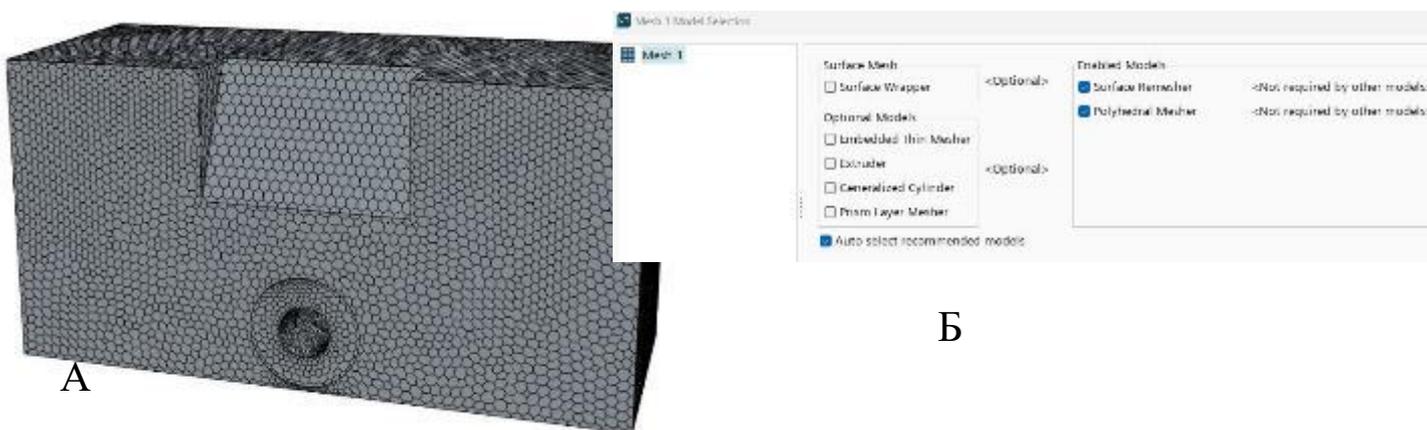


Рис.2.3 – Створення сітки: А – вигляд моделі після створення сітки; Б – параметри сітки.

Для чисельного моделювання процесу перемішування та аерації компостної маси в зоні роботи барабанно-лопатевого аератора використано комплекс фізичних моделей STAR-CCM+ (рис.2.4.), що найбільш точно відтворюють поведінку твердої дисперсної суміші у повітряному потоці. Нижче наведемо короткий опис цих моделей.

Multiphase Interaction - забезпечує взаємодію між газовою та твердою фазами, що необхідно для коректного розрахунку піднімання, осідання та транспортування частинок у потоці повітря.

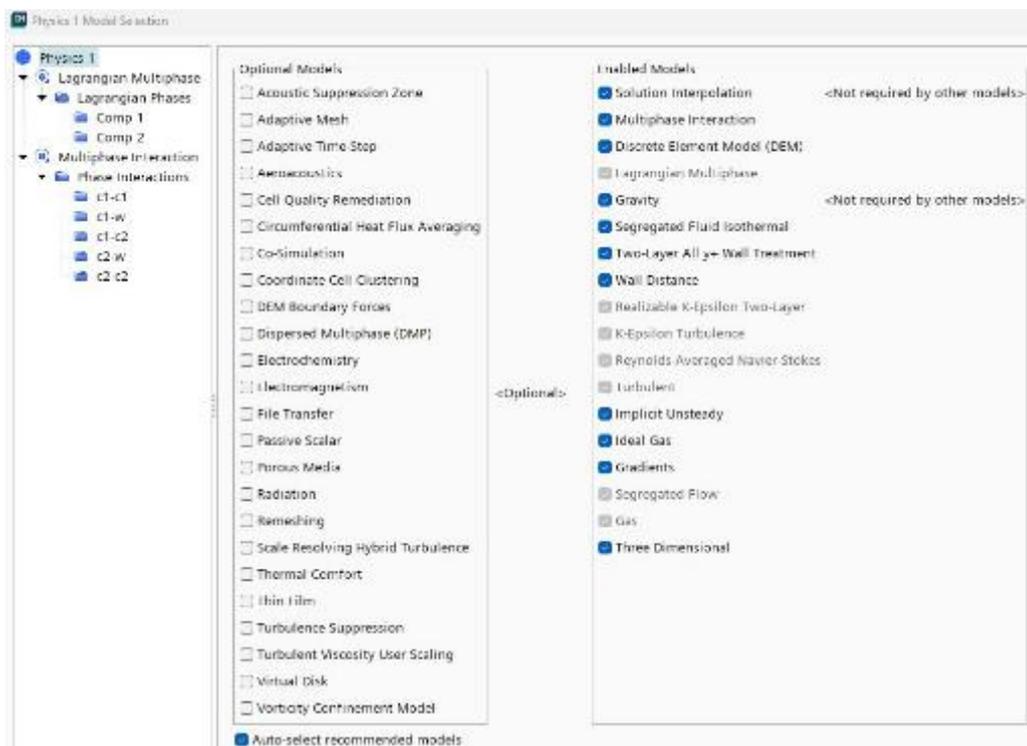


Рис.2.4 – Вибір фізичних моделей

Discrete Element Method (DEM) - дозволяє моделювати рух індивідуальних частинок компосту, їхні зіткнення, тертя та агломерацію. Ця модель є необхідною через високий рівень неоднорідності та гранулярності матеріалу.

Lagrangian Phases - окреме описання фракцій компосту з різними фізико-механічними властивостями забезпечує точніший розрахунок траєкторій та швидкості їх перемішування.

Gravity - враховує вагу частинок та визначає процес формування бурта й осідання матеріалу після перекидання.

Segregated Fluid Isothermal - описує повітряний потік у зоні обертання барабана без ускладнення моделі тепловими розрахунками, які на цьому етапі не є визначальними.

Realizable k-ε Two-Layer Turbulence Model - застосована для моделювання турбулентних вихорів, що формуються під дією лопатей аератора. Забезпечує стабільний та точний розрахунок потоків у складній геометрії.

Wall Distance - необхідна допоміжна модель для коректної роботи турбулентності у приповерхневих областях.

Implicit Unsteady - Нестационарна схема дозволяє відтворити реальний динамічний процес переміщення частинок та формування бурта у часі.

Ideal Gas - використана для опису властивостей повітря, яке не зазнає значних температурних або тискових змін у робочій зоні.

Three-Dimensional - тривимірна постановка задачі є обов'язковою, оскільки рух частинок, робота лопатей і формування бурта неможливо коректно відтворити у 2D.

В розділі «Лагранжова мультифазність» створюємо фази (частинки) та задаємо їм параметри як показано на рис.2.5 та наведемо короткий опис цих параметрів.

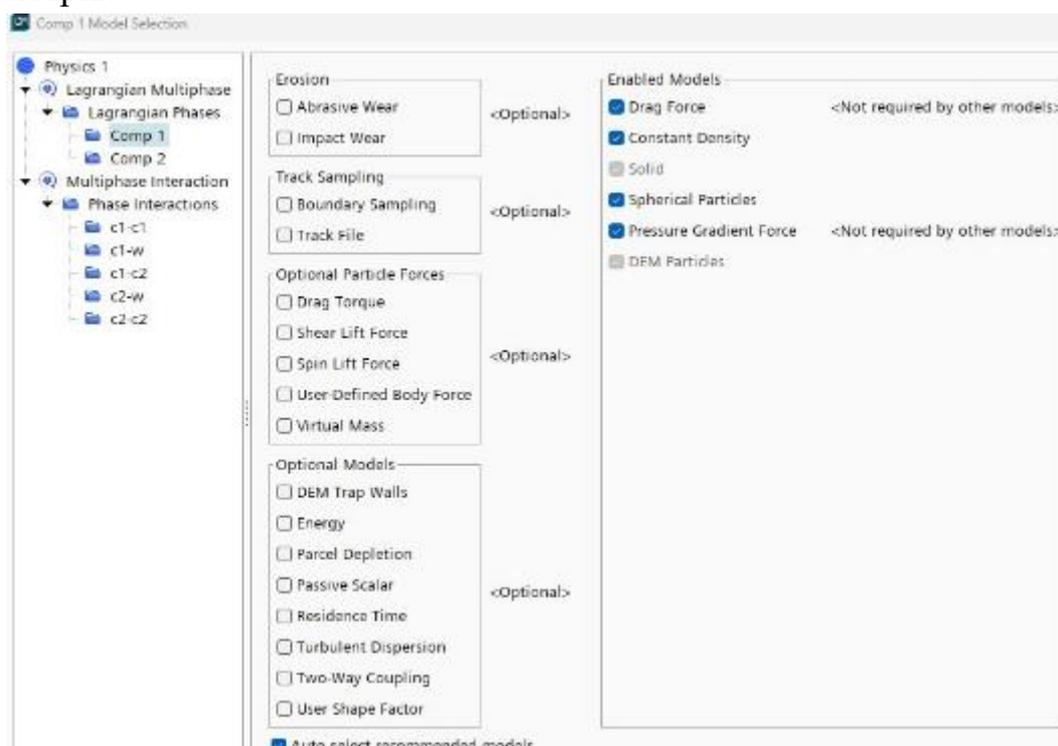


Рис.2.5 – Параметри часточок

Drag Force – враховує аеродинамічний опір повітря, що визначає траєкторію та швидкість частинок під час перекидання.

Constant Density – густина частинок вважається сталою, що відповідає реальним умовам короткочасного процесу аерації.

Spherical Particles – частинки моделюються як сферичні для спрощення DEM-розрахунків і зменшення обчислювальних витрат.

Pressure Gradient Force – забезпечує рух частинок у полі тиску, що виникає від роботи барабана й потоку повітря.

Задаємо фізико-механічні властивості (коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, густина, силу тяжіння, силу тертя і т.д.). Задаємо параметр взаємодії між частинками c1-c1, c1-w, c1-c2, c2-w, c2-c2, де c1 – часточка 1, c2 – часточка 2, w - стіна. Для прикладу наведемо c1-c1 тобто взаємодію частинки один з частинкою один рис.2.6.

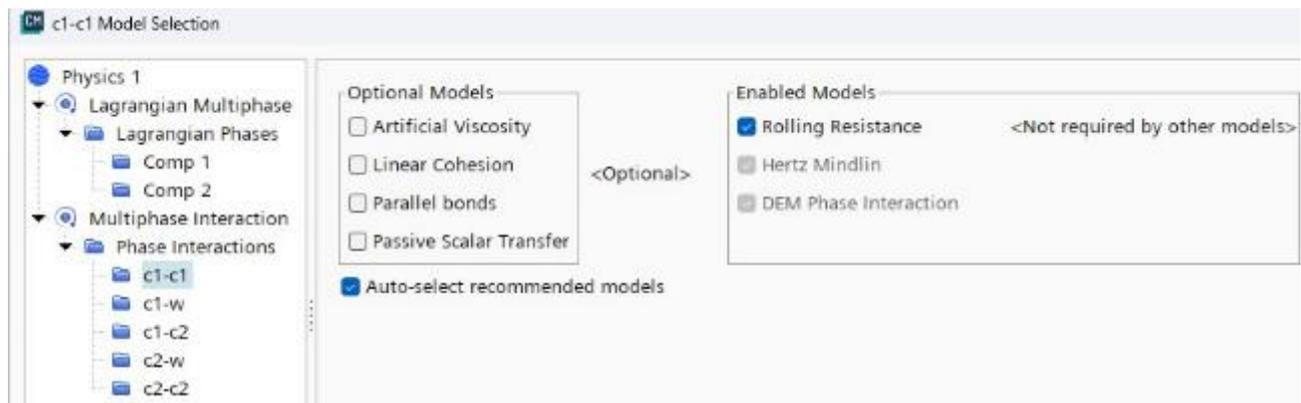


Рис.2.6 – Параметри взаємодії частинок c1-c1

Rolling Resistance – увімкнено для врахування опору коченню між частинками. У реальному компості частинки не котяться вільно через нерівну форму, тертя й злипання, тому ця модель підвищує реалістичність DEM-руху.

Hertz–Mindlin та DEM Phase Interaction – вимкнені, оскільки вони суттєво ускладнюють розрахунок і потрібні лише для моделювання пружних деформацій та адгезії, які не є критичними у даній задачі.

Похідних частинках створюємо два види частинок та задаємо їм час творення та частоту (рис.2.7). Два види частинок необхідні для того, щоб краще зрозуміти наскільки добре аератор перемішує компостну масу.

▼ Particle Flow Rate	
Method	Constant
Value	$\$Time < 13 ? 500 : 0$
Dimensions	/Time
▼ Particle Flow Rate	
Method	Constant
Value	$\$Time > 13 ? \$Time < 26.4 ? 500 : 0 : 0$
Dimensions	/Time

Рис.2.7 – Параметр часточок

Оскільки нам необхідно, щоб часточки з'являлись протягом певного проміжку часу то ми не просто задаємо значення, а використовуємо формули « $\$Time < 13 ? 500 : 0$ » - що означає, що часточки будуть з'являтися до 13 секунд та « $\$Time > 13 ? \$Time < 26.4 ? 500 : 0 : 0$ » - часточки з'являються в проміжку часу від 13 до 26.4 секунд.

Далі запускаємо генерацію частинок (рис.2.8) та очікуємо формування бурта, в нашому випадку це займає 26,5 секунд. Висота бурта складає близько 1 м. Для різних густин значення висоти бурта сформованої за 26,5 секунд певною мірою відрізняється.

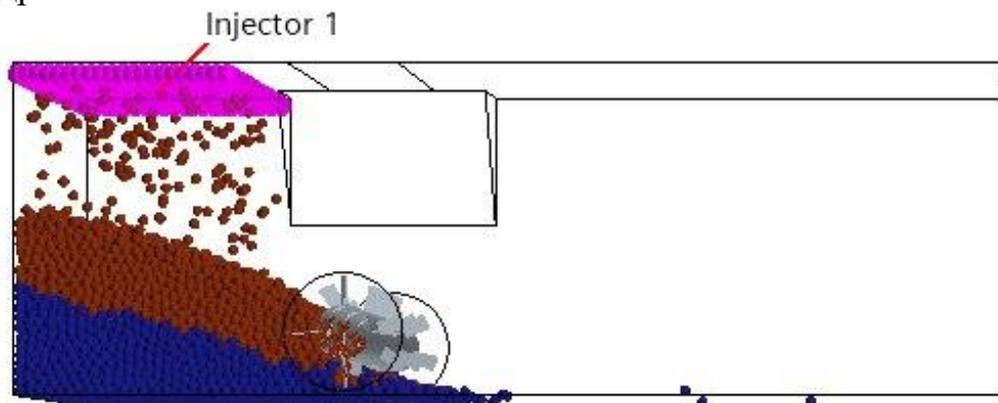


Рис.2.8 – Формування бурта

На рис.2.8 видно барабан, робочу область, часточки та «Injector 1». Часточки відрізняються за кольором для кращого візуального сприйняття. Область «Injector 1» слугує областю генерації частинок 1, для генерації частинок 2 використовується аналогічна область «Injector 2», яка знаходиться в тому ж місці (не показана на рисунку).

Частоту обертання та швидкість руху також задамо за допомогою формул (рис.2.9). В формулах вказано, що обертання/рух починається після 26.5 секунд. Параметри  $n$  та  $V$  задаються та змінюються вручну, де  $n$  – частота обертання, а  $V$  – швидкість руху.

▼ ● Constant	
Value	[0.0, 0.0, \$Time < 26.5 ? 0 : \${V}]
▼ ● Rotation Rate	
Rotation Rate	\$Time < 26.5 ? 0 : 2*3.14*\${n}

Рис.2.9 – Значення частоти обертання та швидкості руху

Створюємо місця відбору компонентів `prob`. Розташовуємо їх хаотично з правого боку (рис.2.10). Для отримання якогось числа з цих `prob` необхідно створити звіти. Звітам надаємо наступні назви «1sum1», «1sum2», «2sum1», «2sum2», «3sum1», «3sum2», «4sum1», «4sum2», «5sum1», «5sum2». Назви розшифровуються наступним чином: «1sum2» - кількість компонентів 2 в пробі 1.

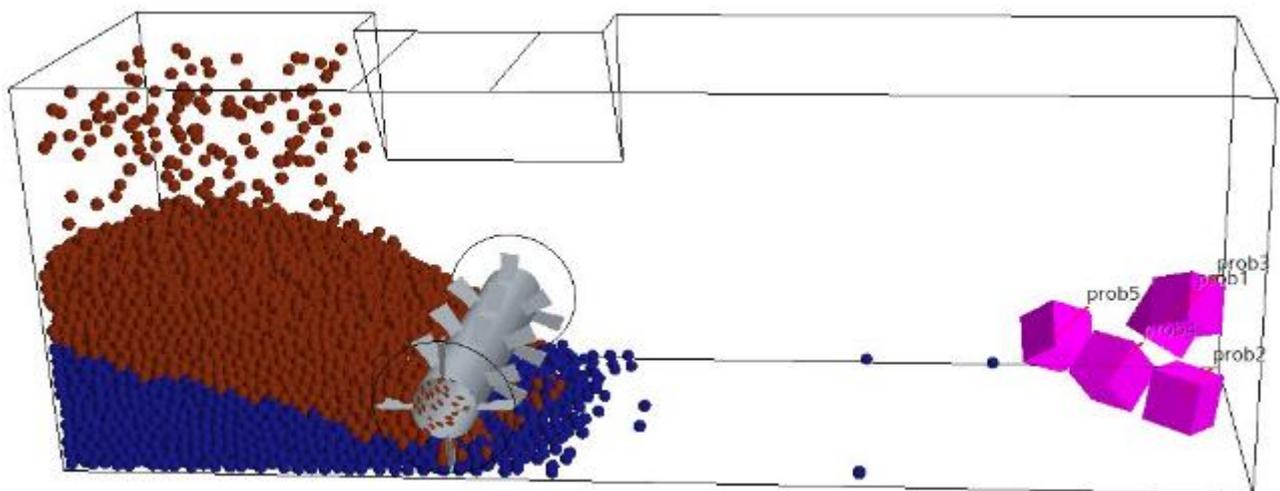


Рис.2.10 – Розташування місць відбору компонентів

Для отримання одного числа з усіх звітів створюємо звіт «Expression» який буде вираховувати коефіцієнт однорідності за формулою показаною на рис.2.11.

```
1 - (abs(${1sum1}-${1sum2})/(${1sum1}+${1sum2}))+
abs(${2sum1}-${2sum2})/(${2sum1}+${2sum2}))+
abs(${3sum1}-${3sum2})/(${3sum1}+${3sum2}))+
abs(${4sum1}-${4sum2})/(${4sum1}+${4sum2}))+
abs(${5sum1}-${5sum2})/(${5sum1}+${5sum2}))/5
```

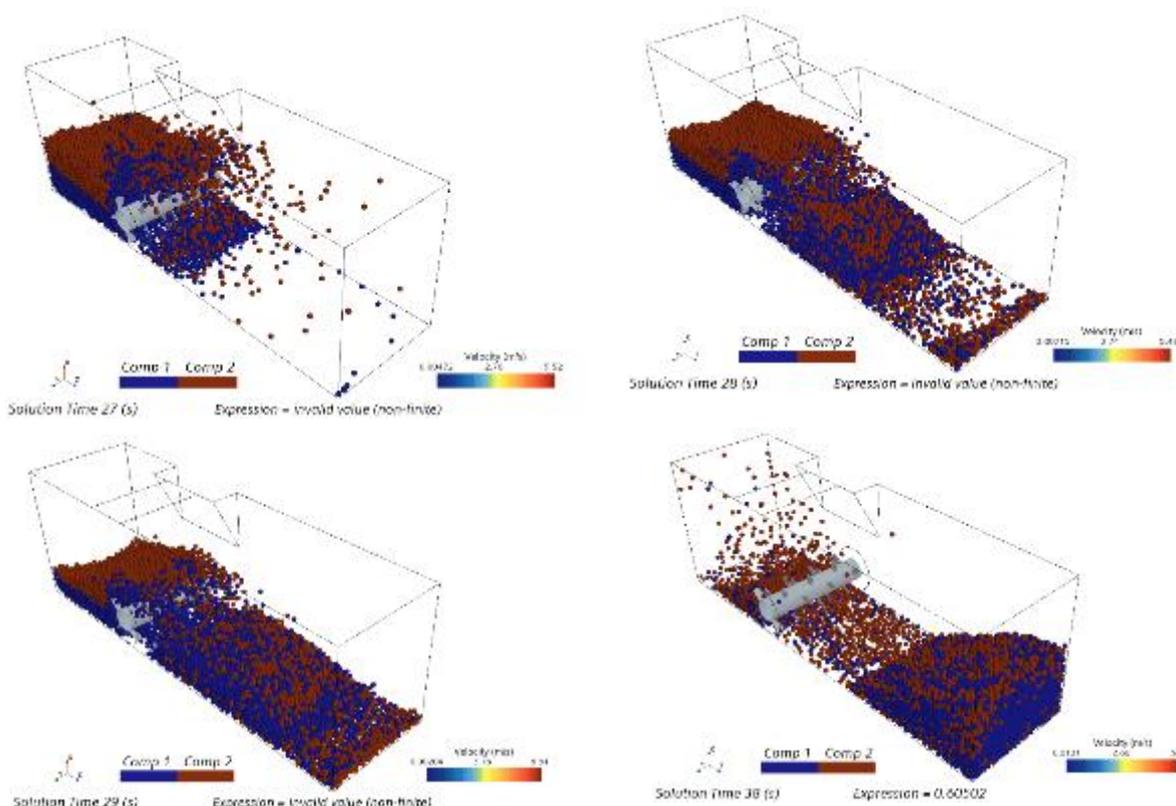
Рис.2.11 – Формула коефіцієнту однорідності

Після цього можна запускати програму, записувати результати. Для отримання результатів необхідно провести 27 дослідів змінюючи раніше зазначені фактори, а саме: частоту обертання, швидкість руху, густину. Рівні факторів моделювання показані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Рівні факторів моделювання

	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	n, об/хв	V, м/с
-1	560	160	0,29
0	760	260	0,58
1	960	360	0,87

На рис.2.12, 2,13, та 2,14 наведемо зображення процесу дослідження для різних факторів.

Рис.2.12 – Дослідження при факторах:  $\rho = 560$  кг/м<sup>3</sup>,  $n = 260$  об/хв,  $V = 0,58$  м/с

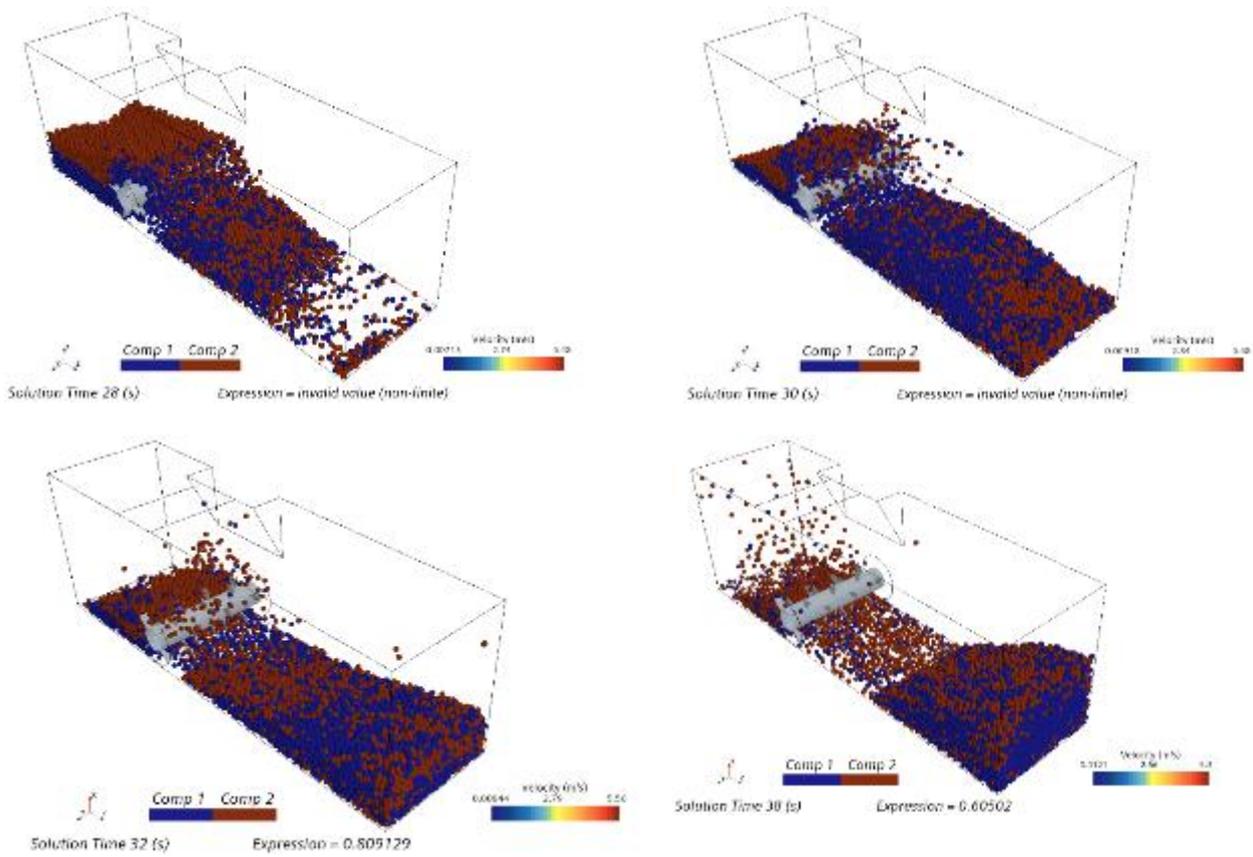


Рис.2.13 – Дослідження при факторах:  $\rho = 760 \text{ кг/м}^3$ ,  $n = 260 \text{ об/хв}$ ,  $V = 0,58 \text{ м/с}$

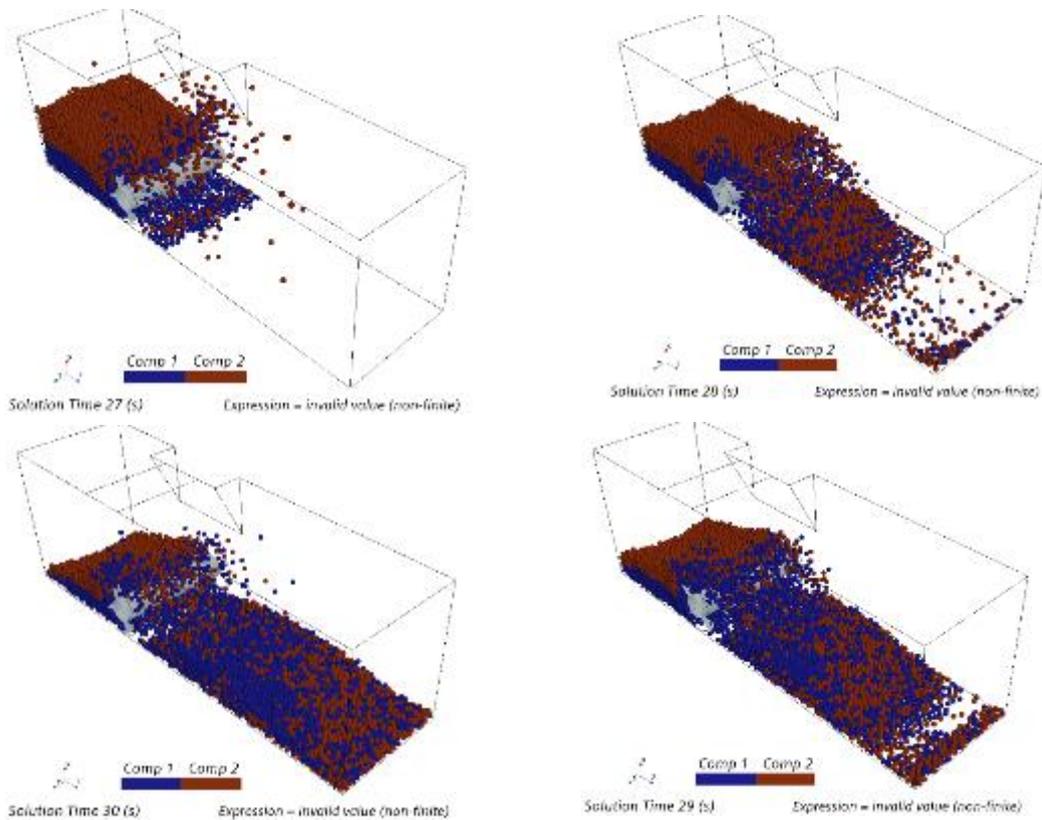


Рис.2.14 – Дослідження при факторах:  $\rho = 960 \text{ кг/м}^3$ ,  $n = 260 \text{ об/хв}$ ,  $V = 0,58 \text{ м/с}$

### 2.2.2 Методи обробки результатів дослідження

В результаті досліджень проведених в розділі 2.2.1 отримано 27 значень  $H$  (висоти бурта) та  $k$  (коефіцієнт однорідності). Для обробки результатів дослідження будемо використовувати Star-CCM+ та Wolfram Cloud.

В Star-CCM+ створюємо графік по звіту «Expression», а також графік розташування частинок «XY».

Для більш глибокого дослідження області оптимальних значень та зон поверхні відгуку, де спостерігається суттєва кривизна, проста лінійна модель вже не забезпечує достатньої точності. У таких ситуаціях математичний опис зазвичай потребує використання полінома другого порядку, а в окремих випадках - і третього, що формується на основі відповідних експериментальних планів.

Плани другого порядку дають змогу побудувати повну квадратичну модель, яка, окрім основних ефектів  $b_i$ , включає парні взаємодії  $b_{ij}$  та квадратичні члени  $b_{ii}$ . Водночас плани типу  $2k$  не дозволяють однозначно оцінити коефіцієнти  $b_{ij}$  у квадратичних функціях і коефіцієнт  $b_0$ . [16]

Застосування повного факторного експерименту  $3k$  для побудови полінома другого порядку є малоефективним, оскільки трирівневі плани суттєво збільшують кількість необхідних дослідів. Тому їх зазвичай використовують лише на заключних етапах досліджень - коли потрібно детально описати експериментальну область, а апріорної інформації недостатньо, і модель доводиться уточнювати поетапно: від найпростішої лінійної до повної квадратичної. [16]

У подібних випадках найбільш доцільним вибором стають композиційні плани, які забезпечують отримання повної квадратичної моделі при мінімально необхідній кількості експериментів.

Рівняння регресії має вигляд:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq m} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq m} b_{ij} x_{ij} + \sum_{1 \leq i \leq m} b_{ii} x_{ii}^2 + \dots \varepsilon \quad (2.1)$$

$\hat{y}$  – вибіркова оцінка функції відгуку  $y$ ;

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коефіцієнти регресії, що визначаються на основі вибіркового даних. Добір факторів, що впливають на досліджуваний параметр, здійснюється насамперед з урахуванням їхнього змістового значення та реального впливу на процес. Щоб забезпечити достовірність отриманих оцінок, кількість включених у модель змінних має становити не більше ніж третину від загального обсягу доступних експериментальних даних (тобто  $m < n/3$ ).

У моделі (2.1) присутній доданок  $\varepsilon$  - випадкова величина, що має нормальний розподіл із математичним сподіванням, рівним нулю, та дисперсією  $\sigma^2(\hat{y})$ . Цей член відображає вплив неконтрольованих випадкових факторів, а також похибки, пов'язані з оцінюванням коефіцієнтів моделі на основі експериментальних даних.

Задачу регресійного аналізу доцільно формулювати, подаючи рівняння у матричній формі, що значно спрощує подальші обчислення.

Враховуючи раніше описане переходимо в Wolfram Cloud та виконуємо розрахунки. Переводимо отримані значення  $k$  та  $N$  в матричний вигляд  $MQ$  (рис.2.14).

А

```

m[-]- MQ = {{-1, -1, -1, 0.804}, {-1, -1, 0, 0.537}, {-1, -1, 1, 0.877}, {-1, 0, -1, 0.904}, {-1, 0, 0, 0.746}, {-1, 0, 1, 0.776}, {-1, 1, -1,
0.874}, {-1, 1, 0, 0.781}, {-1, 1, 1, 0.838}, {0, -1, -1, 0.688}, {0, -1, 0, 0.579}, {0, -1, 1, 0.803}, {0, 0, -1, 0.730}, {0, 0, 0,
0.689}, {0, 0, 1, 0.793}, {0, 1, -1, 0.781}, {0, 1, 0, 0.732}, {0, 1, 1, 0.682}, {1, -1, -1, 0.665}, {1, -1, 0, 0.532}, {1, -1, 1,
0.519}, {1, 0, -1, 0.718}, {1, 0, 0, 0.672}, {1, 0, 1, 0.613}, {1, 1, -1, 0.729}, {1, 1, 0, 0.567}, {1, 1, 1, 0.632}};
nlmQ = NonlinearModelFit[MQ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 + a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 + a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a23 * x2 * x3 + a33 * x3^
2, {a00, a10, a20, a30, a11, a12, a13, a22, a23, a33}, {x1, x2, x3}];
Normal[nlmQ]
nlmQ["ParameterTable"]
nlmQ["ANOVATable"]
nlmQ["FitCurvatureTable"]

```

Б

```

MQ = {{-1, -1, -1, 0.631}, {-1, -1, 0, 0.775}, {-1, -1, 1, 0.801}, {-1, 0, -1, 0.71}, {-1, 0, 0, 0.755}, {-1, 0, 1, 0.812}, {-1, 1, -1,
0.716}, {-1, 1, 0, 0.79}, {-1, 1, 1, 0.815}, {0, -1, -1, 0.626}, {0, -1, 0, 0.768}, {0, -1, 1, 0.782}, {0, 0, -1, 0.668}, {0, 0, 0,
0.775}, {0, 0, 1, 0.775}, {0, 1, -1, 0.696}, {0, 1, 0, 0.783}, {0, 1, 1, 0.796}, {1, -1, -1, 0.603}, {1, -1, 0, 0.734}, {1, -1, 1,
0.765}, {1, 0, -1, 0.664}, {1, 0, 0, 0.783}, {1, 0, 1, 0.76}, {1, 1, -1, 0.684}, {1, 1, 0, 0.746}, {1, 1, 1, 0.768}};
nlmQ = NonlinearModelFit[MQ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 + a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 + a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a23 * x2 * x3 + a33 * x3^
2, {a00, a10, a20, a30, a11, a12, a13, a22, a23, a33}, {x1, x2, x3}];
Normal[nlmQ]
nlmQ["ParameterTable"]
nlmQ["ANOVATable"]
nlmQ["FitCurvatureTable"]

```

Рис.2.14 – Задання команд та вихідних даних в Wolfram Cloud для: А – величини  $k$ ; Б – величини  $N$ .

Після цього використовуємо функцію «NonlinearModelFit», яка дозволяє визначити рівняння регресії методом найменших квадратів. Першим елементом

функції задаємо матрицю, другим рівняння в тому вигляді, в якому нам потрібно. Далі вказуємо аргументи які необхідно знайти (a00, a10, a20, a30, a12, a11, a13, a22, a23, a33) , а також фактори (x1, x2,x3) відносно яких буде йти розрахунок. Окрім цього необхідно використати функції Normal [nlmQ], яка приведе функцію nlmQ в нормальний вигляд. Також використовуємо функції «ParameterTable», «ANOVATable» та «FitCurvatureTable» (рис.2.14).

Після запуску розрахунку отримуємо рівняння регресії (в закодованому вигляді, яке необхідно розкодувати) та таблицю зі розрахованими значенням для кожного з аргументів. Все це показано на рис.2.15.

Out[-] = 0.679148 - 0.0827778 x1 - 0.06944444 x1<sup>2</sup> + 0.034 x2 - 0.08525 x1 x2 - 0.0367778 x2<sup>2</sup> - 0.02 x3 - 0.0214167 x1 x3 - 0.0228333 x2 x3 + 0.0975556 x3<sup>2</sup>

**А**

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	0.679148	0.0342899	19.806	3.50919e-12
a10	-0.0827778	0.0156732	-5.21495	0.0000700634
a20	0.034	0.0156732	2.14198	0.0469092
a30	-0.02	0.0156732	-1.25999	0.224606
a11	-0.00944444	0.0274931	-0.34352	0.735419
a12	-0.00525	0.0194406	-0.270054	0.79037
a13	-0.0214167	0.0194406	-1.10165	0.285968
a22	-0.0367778	0.0274931	-1.33771	0.198613
a23	-0.0228333	0.0194406	-1.17452	0.256378
a33	0.0975556	0.0274931	3.54896	0.00247081

Out[-] = 0.773259 - 0.0165556 x1 - 0.00144444 x1<sup>2</sup> + 0.0171667 x2 - 0.0015 x1 x2 - 0.00694444 x2<sup>2</sup> + 0.0597778 x3 - 0.00241667 x1 x3 - 0.0170833 x2 x3 - 0.0414444 x3<sup>2</sup>

**Б**

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	0.773259	0.00833851	92.5116	2.02709e-24
a10	-0.0165556	0.00386924	-4.27876	0.000507666
a20	0.0171667	0.00386924	4.4367	0.000361574
a30	0.0597778	0.00386924	15.4495	1.93621e-11
a11	-0.00144444	0.00670172	-0.215533	0.831916
a12	-0.0015	0.00473883	-0.316534	0.755451
a13	-0.00241667	0.00473883	-0.509971	0.616529
a22	-0.00694444	0.00670172	-1.03622	0.314616
a23	-0.0170833	0.00473883	-3.60497	0.00218521
a33	-0.0414444	0.00670172	-6.18415	9.99831e-6

Рис.2.15 – Закодоване рівняння регресії та таблиця значень: А – величини k; Б – величини N.

Для розкодування рівняння регресії необхідно визначити коефіцієнт Стьюдента. Його визначаємо за табличкою [17]. Для цього спочатку визначимо ступінь свободи за формулою:

$$f = N - 1, \quad (2.2)$$

де  $N$  – число дослідів;

Тоді:

$$f = 27 - 1 = 26$$

Рівень значимості приймаємо 0,05, тоді коефіцієнт Стьюдента буде складати 2,05. Відкидаємо аргументи в яких значення «t-Statistic» менше за коефіцієнт Стьюдента та прописуємо нові рівняння. Задаємо діапазони факторів, прописуємо формули розкодування, знаходимо мінімум та максимум (рис.2.16).

**А**

```

ZQ[x1_, x2_, x3_] := 0.679148 - 0.0827778 * x1 + 0.034 * x2 + 0.0975556 * x3
x10 = 760;
dx1 = 200;
x20 = 260;
dx2 = 100;
x30 = 0.58;
dx3 = 0.29;
RQ[p_, n_, v_] := ZQ[(p - x10) / dx1, (n - x20) / dx2, (v - x30) / dx3]
FindMinimum[{RQ[p, n, v], x10 - dx1 <= p <= x10 + dx1, x20 - dx2 <= n <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= v <= x30 + dx3}, {p, x10 - 0 dx1}, {n, x20 - 0 dx2}, {v, x30 - 0 dx3}]
FindMaximum[{RQ[p, n, v], x10 - dx1 <= p <= x10 + dx1, x20 - dx2 <= n <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= v <= x30 + dx3}, {p, x10 - 0 dx1}, {n, x20 - 0 dx2}, {v, x30 - 0 dx3}]
Plot3D[RQ[p, n, x30], {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, AxesLabel -> {"\rho, кг/м³", "n, об/хв", "δ"}]
Plot3D[RQ[p, x20, v], {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {v, x30 - dx3, x30 + dx3}, AxesLabel -> {"\rho, кг/м³", "v, м/с", "δ"}]
Plot3D[RQ[v, n, x10], {v, x30 - dx3, x30 + dx3}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, AxesLabel -> {"v, м/с", "n, об/хв", "δ"}]
{0.464815, {p -> 960., n -> 160., v -> 0.29}}
{0.893481, {p -> 560., n -> 360., v -> 0.87}}

ZQ[x1_, x2_, x3_] := 0.773259 - 0.0165556 * x1 - 0.017166 * x2 + 0.0597778 * x3 - 0.0170833 * x2 * x3 - 0.0414444 * x^3
x10 = 760;
dx1 = 200;
x20 = 260;
dx2 = 100;
x30 = 0.58;
dx3 = 0.29;
RQ[p_, n_, v_] := ZQ[(p - x10) / dx1, (n - x20) / dx2, (v - x30) / dx3]
FindMinimum[{RQ[p, n, v], x10 - dx1 <= p <= x10 + dx1, x20 - dx2 <= n <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= v <= x30 + dx3}, {p, x10 - 0 dx1}, {n, x20 - 0 dx2}, {v, x30 - 0 dx3}]
FindMaximum[{RQ[p, n, v], x10 - dx1 <= p <= x10 + dx1, x20 - dx2 <= n <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= v <= x30 + dx3}, {p, x10 - 0 dx1}, {n, x20 - 0 dx2}, {v, x30 - 0 dx3}]
Plot3D[RQ[p, n, x30], {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, AxesLabel -> {"\rho, кг/м³", "n, об/хв", "δ"}]
Plot3D[RQ[p, x20, v], {p, x10 - dx1, x10 + dx1}, {v, x30 - dx3, x30 + dx3}, AxesLabel -> {"\rho, кг/м³", "v, м/с", "δ"}]
Plot3D[RQ[v, n, x10], {v, x30 - dx3, x30 + dx3}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, AxesLabel -> {"v, м/с", "n, об/хв", "δ"}]
{0.464815, {p -> 960., n -> 160., v -> 0.29}}
{0.893481, {p -> 560., n -> 360., v -> 0.87}}

```

**Б**

Рис.2.16 – Розкодування рівняння: А – величини k; Б – величини Н.

Результати дослідження та обробки результатів дослідження наведемо в розділі 2.3.

### 2.3 Результати досліджень

Після проведення чисельного моделювання 27 досліджень отримали значення k (коефіцієнт однорідності) та Н (вихідна висота бурту). Ці значення наведені в таблиці 2.2.

Таблиці 2.2 – Отримання значення k та H.

	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	n, об/хв	V, м/с	k	H, м
1	560	160	0,29	0,804	0,631
2	560	160	0,58	0,537	0,775
3	560	160	0,87	0,877	0,801
4	560	260	0,29	0,904	0,71
5	560	260	0,58	0,746	0,755
6	560	260	0,87	0,776	0,812
7	560	360	0,29	0,874	0,716
8	560	360	0,58	0,781	0,79
9	560	360	0,87	0,838	0,815
10	760	160	0,29	0,688	0,626
11	760	160	0,58	0,579	0,768
12	760	160	0,87	0,803	0,782
13	760	260	0,29	0,730	0,668
14	760	260	0,58	0,689	0,775
15	760	260	0,87	0,793	0,775
16	760	360	0,29	0,781	0,696
17	760	360	0,58	0,732	0,783
18	760	360	0,87	0,682	0,796
19	960	160	0,29	0,665	0,603
20	960	160	0,58	0,532	0,734
21	960	160	0,87	0,519	0,765
22	960	260	0,29	0,718	0,664
23	960	260	0,58	0,672	0,783
24	960	260	0,87	0,613	0,76
25	960	360	0,29	0,729	0,684
26	960	360	0,58	0,567	0,746
27	960	360	0,87	0,632	0,768

В ПЗ Star-CCM+ за результатами дослідження було створено графіки розташування частинок та графіки зміни однорідності. Для прикладу приведемо графіки для дослідження 14 на рис.2.17. Графік однорідності починається не з нуля, оскільки для визначення однорідності необхідно щоб всі проби були заповнені рис.2.9.

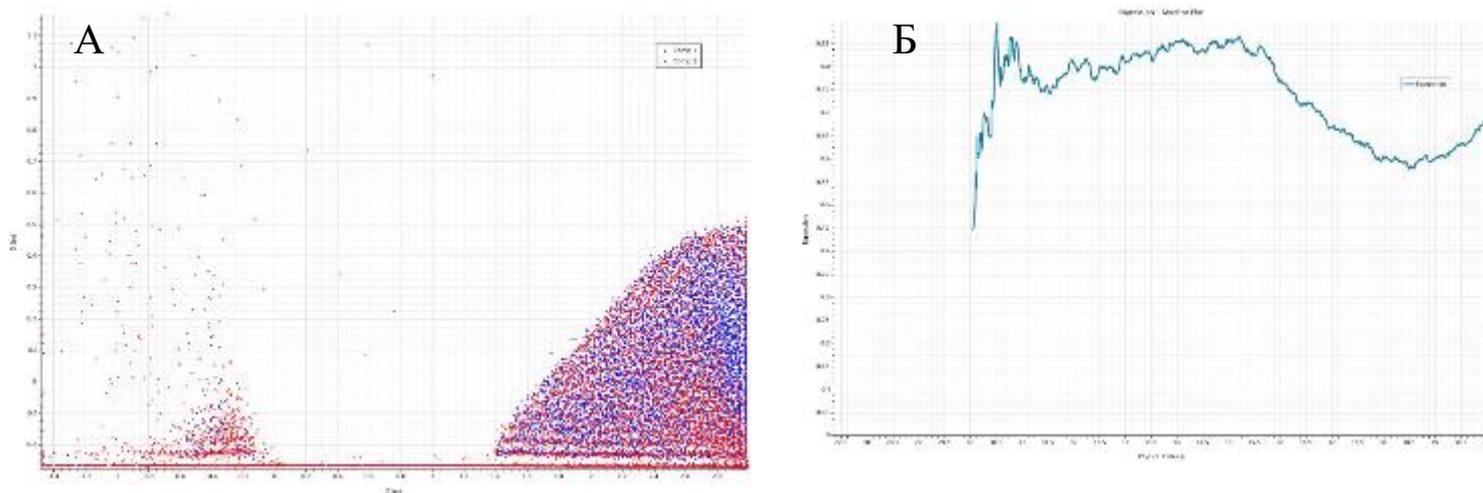


Рис.2.17 – Графіки з Star-CCM+: А – графік розташування частинок в кінці досліду (40 секунд); Б – графік зміни коефіцієнту однорідності.

Після обробки числових даних в Wolfram Cloud було отримано шість тривимірних графіків (рис.2.18 та рис.2.19).

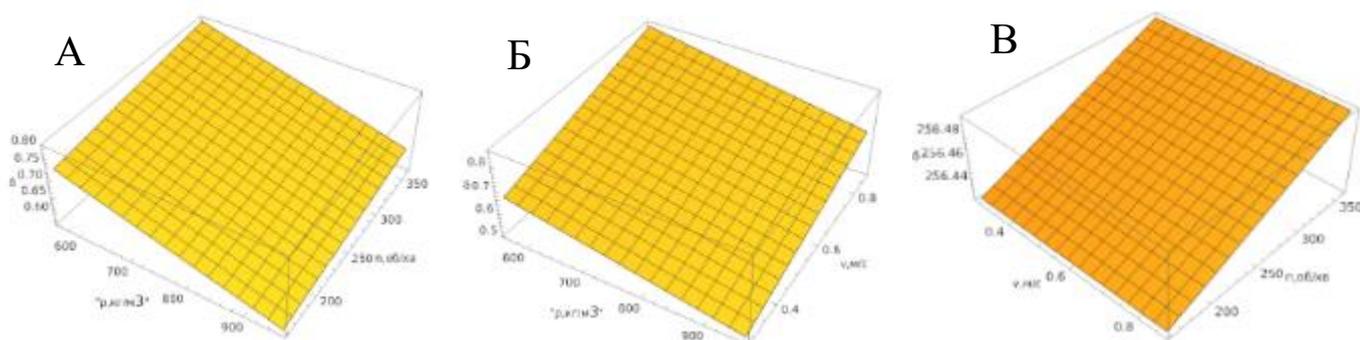


Рис.2.18 – Графіки залежності k від факторів: А –  $\rho$  та  $n$ ; Б –  $\rho$  та  $V$ ; В –  $V$  та  $n$ .

З рис.2.18 можна зробити висновок, що зі збільшенням густини компосту  $\rho$  значення  $k$  помітно зменшується. Наприклад:

- Для  $560 \text{ кг/м}^3$   $k \approx 0.80\text{--}0.90$ ;
- Для  $760 \text{ кг/м}^3$   $k \approx 0.57\text{--}0.80$ ;
- Для  $960 \text{ кг/м}^3$   $k \approx 0.52\text{--}0.73$ ;

Це свідчить, що важкі суміші перемішуються гірше - через більший внутрішній опір, більшу щільність і слабшу рухливість частинок.

Вплив частоти обертання барабана на  $k$  стабільний.

- $n = 160 \text{ об/хв}$  дає найгірші результати, особливо при важких масах.

- $n = 260$  об/хв - оптимальний компроміс, забезпечує стабільно високі  $k$ .
- $n = 360$  об/хв - покращує перемішування, але іноді дає зниження  $k$  при великих густинах ( $960 \text{ кг/м}^3$ ), бо матеріал не встигає захоплюватися лопатями.

Швидкість переміщення агрегату впливає на коефіцієнт  $k$  наступним чином:

- Швидкість  $0,87 \text{ м/с}$  дає найкраще перемішування, бо забезпечує інтенсивне перекидання.
- $0,58 \text{ м/с}$  - середній рівень перемішування.
- $0,29 \text{ м/с}$  - найнижча якість змішування (матеріал накопичується під барабаном, менше перемішується).

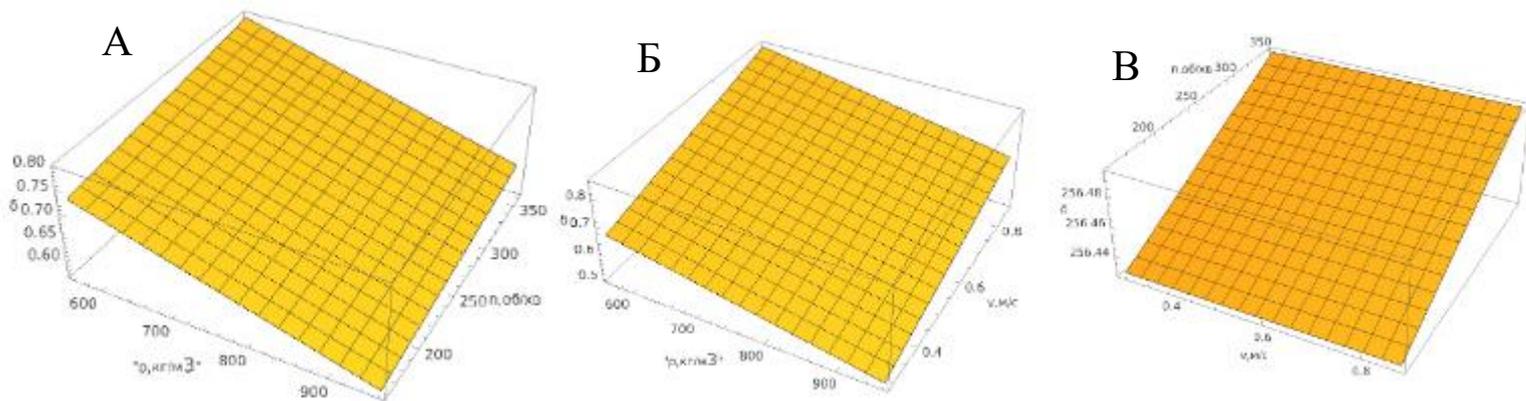


Рис.2.19 – Графіки залежності  $N$  від факторів: А –  $\rho$  та  $n$ ; Б –  $\rho$  та  $V$ ; В –  $V$  та  $n$ .

З рис.2.19 можна зробити висновок, що зі збільшенням густини компосту  $\rho$  значення  $N$  помітно зменшується. Наприклад:

- Для  $560 \text{ кг/м}^3$   $N = 0.71\text{--}0.812 \text{ м}$ ;
- Для  $760 \text{ кг/м}^3$   $N = 0.626\text{--}0.796 \text{ м}$ ;
- Для  $960 \text{ кг/м}^3$   $N = 0.603\text{--}0.765 \text{ м}$ ;

Вплив частоти обертання на висоту бурта:

- При  $n=260$  об/хв висота бурта найбільша (для всіх густин).
- $n=160 \rightarrow$  бурт виходить нижчий (недостатня енергія).
- $n=360 \rightarrow$  бурт інколи нижчий, бо матеріал розкидається занадто розріджено або не формує щільний шар.

Вплив швидкості переміщення агрегату на висоту бурта:

- Найвища  $H$  при швидкості 0,29–0,58 м/с.
- На 0,87 м/с бурт стає нижчим - матеріал летить далі, але розпорошується і не утворює високий вал.

Як бачимо між  $k$  і  $H$  існує конфлікт оптимізації, який треба врівноважувати залежно від технологічного завдання. В таблиці 2.3 наведемо найкращі результати, тобто такі, в яких  $k$  досягає найбільшого значення. В таблиці 2.4 наведемо оптимальні варіанти, тобто такі, в яких  $k$  та  $H$  високі.

Таблиці 2.3 – Найкращі варіанти

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$n$ , об/хв	$V$ , м/с	$k$	$H$ , м
560	260	0,29	0,904	0,71
760	160	0,87	0,803	0,782
960	360	0,29	0,729	0,684

Таблиці 2.4 – Найбільш оптимальні варіанти

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$n$ , об/хв	$V$ , м/с	$k$	$H$ , м
560	160	0,87	0,877	0,801
760	160	0,87	0,803	0,782
960	260	0,58	0,672	0,783

## 2.4 Висновок до розділу

У даному розділі проведено комплексне дослідження процесів перемішування та формування бурта компостної суміші за допомогою барабанно-лопатевого змішувача-аератора. На основі чисельного моделювання (STAR-CCM+) та подальшої математичної обробки результатів (Wolfram Cloud) були отримані значення коефіцієнта однорідності  $k$  та вихідної висоти бурта  $H$  для 27 режимів роботи агрегату. Дані подано у вигляді поверхонь відгуку, що дало змогу визначити вплив основних факторів - густини суміші  $\rho$ , частоти обертання барабана  $n$  та швидкості переміщення агрегату  $V$ .

Аналіз отриманих графіків показав чітку тенденцію:

- зі збільшенням густини  $\rho$  однорідність  $k$  зменшується;
- одночасно зменшується й вихідна висота бурта  $H$ .

Це пояснюється збільшенням внутрішнього опору, зниженням сипучості та рухливості частинок у важчих сумішах.

Результати свідчать, що частота є критично важливим параметром, а оптимальною частотою є 260 об/хв.

Швидкість в діапазоні 0,58–0,87 м/с забезпечує якісну роботу залежно від технологічної мети.

У ході аналізу встановлено:

- режими, що забезпечують найвищу однорідність  $k$ , не завжди забезпечують найбільшу висоту бурта  $H$ ;
- збільшення інтенсивності перемішування (високе  $V$  або  $n$ ) дає високий  $k$ , але зменшує  $H$  через надмірне розпорошення матеріалу.

Це означає, що потрібно обирати режим залежно від пріоритету технологічного процесу - зрілість компосту або формування більш високого бурта.

У результаті виконаних досліджень:

- Створено повноцінну 3D-модель процесу перемішування та формування бурта.
- Розроблено математичні моделі відгуку для  $k$  та  $H$  за допомогою регресійних рівнянь другого порядку.
- Визначено кількісні закономірності впливу технологічних параметрів на працездатність аератора.
- Отримано рекомендації щодо оптимальних режимів роботи для компостів різної густини.

Таким чином, проведений аналіз дозволяє обґрунтовано рекомендувати оптимальні конструкційно-технологічні параметри роботи змішувача-аератора для прискореного біотермічного компостування з урахуванням фізико-механічних властивостей оброблюваної суміші.

### 3. ДОСЛІДИ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

#### 3.1 Програма лабораторних досліджень

Теоретичні дослідження та результати чисельного моделювання показали необхідність уточнення та експериментальної перевірки впливу конструктивних параметрів і режимів роботи лопатевого барабана на показники формування та стабільності компостного бурта. Зокрема, важливою є оцінка однорідності перемішування та висоти сформованого шару при різних густинах суміші, частотах обертання та швидкостях руху агрегату. Для цього була розроблена програма лабораторних досліджень, спрямована на уточнення оптимальних конструктивно-режимних параметрів роботи розпушувача буртів.

У межах програми застосовувалися такі основні методи: теорія планування експерименту, методи фізичного моделювання та аналізу властивостей компостної маси. На основі цих методів сформовано окрему методичку лабораторних досліджень, яка передбачає визначення структурно-механічних характеристик компонентів суміші, оцінку їх змішуваності та відтворення процесу формування бурта у масштабованих умовах.

Для встановлення необхідної кількості повторностей дослідів використовувалася довірна ймовірність 0,95 та припустима похибка у межах  $\pm 3\sigma$ , де  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення експериментальних даних. За загальноприйнятою методикою кількість повторів, рівна трьом, забезпечує достатню точність для досліджень у галузі техніки та дозволяє надійно встановити закономірності впливу основних чинників на вихідні параметри процесу.

Таким чином, програма лабораторних досліджень передбачає проведення серії експериментів з варіюванням ключових факторів (густини суміші, частоти обертання барабана та швидкості переміщення), реєстрацію параметрів формування бурта та визначення показників однорідності змішування, що є необхідним для подальшої оптимізації роботи аераційно-перемішувального обладнання.

### 3.2 Методика лабораторних досліджень

Лабораторні випробування проводили на спеціально розробленому стенді, який моделював роботу фрезерно-лопатевого барабана аератора компостних сумішей. Барабан був виконаний в масштабі 1:10. Конструкція стенда забезпечувала можливість регулювання основних режимних параметрів, що впливають на інтенсивність перемішування та формування бурта:

- частоти обертання барабана,
- швидкості поступального руху агрегату,
- кута повороту лопаток робочого органа.

У якості досліджуваного матеріалу використовували деревну тирсу вологості 55–60 %, що за механічними властивостями (густина, розсипчастість, здатність до злипання, опір зрушенню) наближена до структурованих компостних мас на початкових етапах біотермічного процесу. Така модельна суміш забезпечує відтворюваність результатів та дозволяє коректно оцінювати поведінку матеріалу при взаємодії з лопатеvim барабаном.



Рисунок 3.1 Експериментальна установка

Для контролю навантаження на привід використовувався амперметр, за допомогою якого вимірювали силу струму електродвигуна. Це дозволяло визначити потужність, необхідну для роботи барабана в різних режимах та при різних конфігураціях лопатей.

Позаду барабана була розміщена приймальна платформа, що давала можливість оцінювати кількість і рівномірність матеріалу, який викидався в зону формування бурта. Цей параметр є ключовим для визначення ефективності змішування та висоти валу.

Порядок проведення досліду.

- Підготовка матеріалу. Тирсу доводили до необхідної вологості, ретельно перемішували та завантажували у приймальний бункер стенда рівномірним шаром.
- Установлення режимів. Для кожної серії дослідів задавалися конкретні значення трьох факторів: частоти обертання барабана; швидкості руху; кута повороту лопаток. Режими комбінували згідно з планом експерименту.
- Проведення процесу перемішування. Стенд запускали у встановленому режимі. Протягом досліду фіксували: висоту сформованого бурта та зміни навантаження на привід.
- Повторність дослідів. Для кожної комбінації факторів виконували не менше трьох повторів, що забезпечує довірчу ймовірність 0,95 та допустиму статистичну похибку для технічних експериментів.

### **3.3 Результати лабораторних досліджень**

Результати досліджень оброблялися за тією ж методикою, що і в розділі 2.2.2.

У проведених дослідженнях змінними виступали такі фактори:  $n$  - кутова швидкість обертання барабана, об/хв;  $v$  - швидкість поступального переміщення

аератора, м/с;  $\alpha$  - кут установки лопатей на барабані, градуси. Як критерії оптимізації було обрано силу струму електропривода, що характеризує енерговитрати процесу, та висоту сформованого бурта, яка визначає ефективність переміщення матеріалу. На основі теоретичних передумов були встановлені рівні та інтервали варіювання факторів, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фактори, інтервали та рівні варіювання факторів

Фактори	Кодоване позначення	Інтервали варіювання	Рівні факторів		
			-1	0	+1
$n$ – частота обертання барабану, об/хв	$x_1$	100	160	260	360
$v$ – швидкість поступального переміщення аератора, м/с	$x_2$	0,29	0,29	0,58	0,87
$\alpha$ - кут установки лопатей, град	$x_3$	8	4	12	20

Для побудови моделі роботи барабана у формі полінома другого порядку було застосовано некомпозиційний план експерименту другого рівня, матрицю якого наведено в таблиці 3.1. Після виконання всіх серій випробувань отримані значення функцій відгуку були систематизовані та подані в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Матриця експериментальних даних функцій відгуку, отриманих у процесі проведення досліджень.

Номер досл.	Інтервали варіювання факторів			Значення функцій відгуку	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	I, А	H, м
1	-1	-1	-1	1,1	0,098
2	-1	-1	0	1,15	0,104

3	-1	-1	1	1,23	0,098
4	-1	0	-1	1,2	0,106
5	-1	0	0	1,25	0,112
6	-1	0	1	1,33	0,106
7	-1	1	-1	1,32	0,098
8	-1	1	0	1,37	0,104
9	-1	1	1	1,45	0,098
10	0	-1	-1	1,25	0,106
11	0	-1	0	1,3	0,112
12	0	-1	1	1,38	0,106
13	0	0	-1	1,35	0,114
14	0	0	0	1,4	0,12
15	0	0	1	1,48	0,114
16	0	1	-1	1,47	0,106
17	0	1	0	1,52	0,112
18	0	1	1	1,6	0,106
19	1	-1	-1	1,4	0,098
20	1	-1	0	1,45	0,104
21	1	-1	1	1,53	0,098
22	1	0	-1	1,5	0,106
23	1	0	0	1,55	0,112
24	1	0	1	1,63	0,106
25	1	1	-1	1,62	0,098
26	1	1	0	1,67	0,104
27	1	1	1	1,75	0,098

Після обробки результатів в Wolfram, рівняння регресії представлені на рис.3.1.

А  $1.4 + 0.15 x_1 - 3.81198 \times 10^{-16} x_1^2 + 0.11 x_2 - 3.41222 \times 10^{-16} x_1 x_2 + 0.01 x_2^2 + 0.065 x_3 - 3.14903 \times 10^{-16} x_1 x_3 - 3.10472 \times 10^{-16} x_2 x_3 + 0.015 x_3^2$

Б  $0.12 + 1.30841 \times 10^{-17} x_1 - 0.008 x_1^2 + 1.45266 \times 10^{-17} x_2 - 2.15155 \times 10^{-17} x_1 x_2 - 0.008 x_2^2 + 1.47976 \times 10^{-17} x_3 - 2.19477 \times 10^{-17} x_1 x_3 - 2.20278 \times 10^{-17} x_2 x_3 - 0.006 x_3^2$

Результати обробки інформації наведено в вигляді тривимірних графіків на рис.3.2, які будувались за допомогою ПЗ Wolfram.

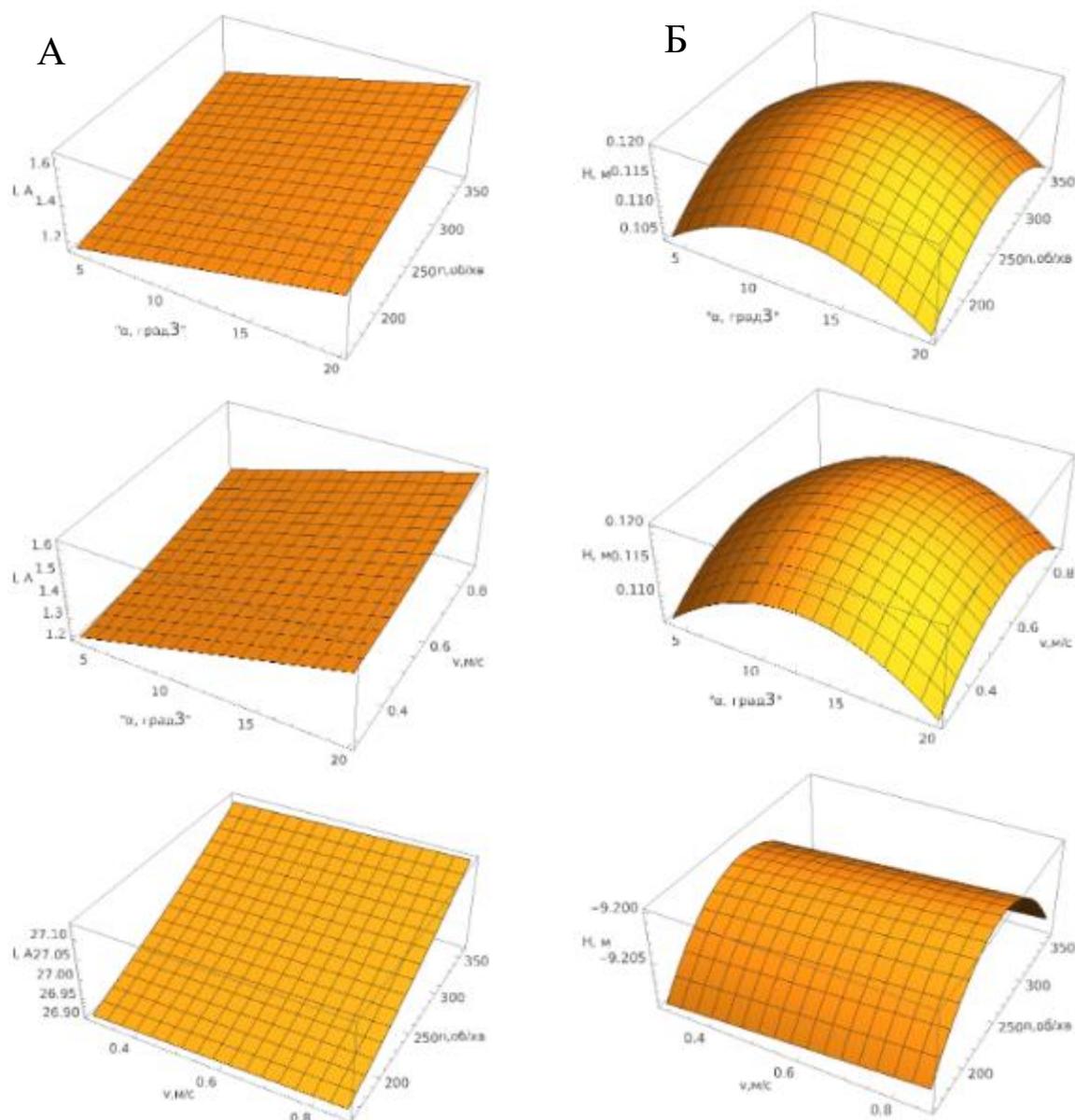


Рис.3.2 – Графічні результати досліджень: А – для сили струму; Б – для висоти.

Розберемо результати досліджень відштовхуючись від графіків. Почнемо з сили струму.

Зі збільшенням кута від  $4^\circ$  до  $20^\circ$  сила струму зростає плавно, що пояснюється збільшенням опору матеріалу на лопатях та більшим об'ємом захоплення тирси. Нахил поверхні є майже лінійним, отже вплив кута  $\alpha$  є монотонним та передбачуваним.

Зростання  $n$  від 160 до 360 об/хв приводить до найбільш значного збільшення  $I$  серед усіх факторів. Графік демонструє майже лінійну залежність,

тобто електродвигун відчутно навантажується зі збільшенням частоти, що є очікуваним результатом.

Зі збільшенням швидкості руху агрегату сила струму зростає, але помірно, з найменшою крутизною поверхні серед трьох факторів. Це свідчить про те, що  $v$  впливає на  $I$ , але не є визначальним фактором навантаження двигуна.

Отже, найбільший вплив має – частота обертання барабану. Середній вплив має – кут встановлення лопаток. Найменший вплив має швидкість переміщення  $v$ .

Розберемо графіки висоти бурта. На відміну від сили струму, поверхні  $H$  мають яскраво виражений параболічний характер.

При малих кутах ( $4\text{--}8^\circ$ ) матеріал підіймається гірше, а  $H$  менше. При середніх кутах ( $12\text{--}16^\circ$ ) формується максимальна висота бурта. При занадто великих кутах ( $20^\circ$ )  $H$  знову падає, бо матеріал більше розсіюється і гірше укладається. Отже вплив кута має оптимум, а не монотонну залежність.

При  $n = 160$  об/хв бурт формується недостатньо - низькі  $H$ . При  $n = 260$  об/хв спостерігається найкраще формування бурта. При  $n = 360$  об/хв  $H$  зменшується, бо потік частинок стає надто енергійним та розпорошує матеріал. Отже  $n$  також має оптимальне значення, що точно узгоджується з теоретичними передумовами.

Найкраща висота бурта досягається при  $0,29\text{--}0,58$  м/с. При  $0,87$  м/с бурт стає нижчим, бо матеріал відлітає далі й погано осідає у вал.

В таблиці 3.3 наведемо три найкращі результати.

Таблиця 3.3 – Найкращі результати лабораторного дослідження

$\alpha$ , град	$n$ , об/хв	$v$ , м/с	$I$ , А	$H$ , м
4	160	0,58	1,15	0,104
4	260	0,58	1,25	0,112
12	160	0,29	1,3	0,112

### 3.4 Висновок до розділу

В результаті лабораторних досліджень встановлено, що найбільший вплив на навантаження приводу має частота обертання барабана: зі зростанням  $n$  сила струму  $A$  підвищується майже лінійно. Кут встановлення лопатей має помірний вплив, а швидкість переміщення - найменший.

Графіки висоти бурта показали параболічний характер залежностей: максимальні значення формуються при середніх кутах ( $\approx 12-16^\circ$ ) та частоті  $n = 260$  об/хв. За надто малих або великих кутів, а також при швидкості  $0,87$  м/с висота бурта зменшується.

Узагальнення даних дозволило визначити найбільш ефективні комбінації параметрів, що забезпечують мінімальні енерговитрати та формування бурта достатньої висоти. Отже, результати лабораторних досліджень підтверджують достовірність моделювання та слугують основою для подальшої оптимізації аераторів компостних сумішей.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з аератором компостних буртів

Охорона праці під час виконання робіт з аерацією компостних буртів регулюється чинними нормативно-правовими актами України, зокрема:

- Законом України «Про охорону праці» №2694-ХІІ [20], який визначає обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, організації навчання та контролю за станом безпеки.
- Кодексом цивільного захисту України [21], що встановлює вимоги щодо дій у разі аварій та надзвичайних ситуацій.
- НПАОП 0.00-1.75-15 «Правила охорони праці у сільському господарстві» [22], які містять вимоги до організації робіт з технікою, обслуговування механізмів та попередження виробничих ризиків.
- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила будови і безпечної експлуатації машин та механізмів» [23] - щодо технічного стану обладнання, захисних кожухів, систем блокування.
- ДСТУ EN 62079:2005 [24] - щодо вимог до інструкцій з безпечної експлуатації обладнання.

Під час аерації компосту можливі небезпечні фактори: підвищена запиленість, виділення газів ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ), рухомі частини барабана, шум, вібрації.

Роботодавець зобов'язаний забезпечити:

- справний технічний стан обладнання;
- регулярні інструктажі (вступний, первинний, повторний);
- забезпечення працівників ЗІЗ;
- наявність засобів пожежогасіння;
- контроль повітряного середовища та вентиляцію робочої зони.

## 4.2 Інструкція з охорони праці при роботі з аератором компостних буртів

Інструкція визначає вимоги безпеки при роботі з аератором компостних буртів. До роботи допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медогляд, навчання та перевірку знань з питань охорони праці згідно з НПАОП 0.00-4.12-05 [25]. Забороняється експлуатація обладнання при виявленні несправностей.

Працівник повинен бути забезпечений:

- спецодягом, рукавицями;
- захисним взуттям з антиковзною підошвою;
- захисними окулярами;
- респіратором (захист від пилу та біоаерозолів);
- навушниками або берушами (рівень шуму при роботі з двигуном може перевищувати норми).

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- перевірити цілісність барабана, лопаток, огорожень.
- переконатися у відсутності сторонніх предметів у зоні дії аератора.
- перевірити справність електромережі та заземлення відповідно до ПУЕ.
- оцінити рівень вологості, щільності та сипучості компостної маси для уникнення перевантаження агрегату.

Вимоги безпеки під час роботи:

- забороняється перебування сторонніх осіб у зоні радіусом менше 3 м навколо аератора.
- стежити за рівномірним захопленням матеріалу.
- у разі зростання струму понад номінальне значення негайно зменшити подачу матеріалу або зупинити агрегат (відповідно до інструкції виробника).
- заборонено очищати робочі органи під час роботи барабана.

- у випадку появи диму, запаху горіння чи вібрацій - негайно зупинити обладнання.

Згідно правил пожежної безпеки, на робочому майданчику повинні бути вогнегасники згідно з НАПБ А.01.001-2014 [26]. Заборонено зберігати паливно-мастильні матеріали ближче ніж 10 м від робочої зони.

Після завершення роботи необхідно зупинити аератор, відключити від мережі, очистити робочу зону. Оглянути обладнання на предмет пошкоджень та залишкових небезпек.

### **4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях**

Вимоги визначаються Кодексом цивільного захисту України [19] та місцевими інструкціями підприємства.

У разі пожежі необхідно:

- негайно відключити живлення.
- повідомити відповідальних осіб та викликати ДСНС.
- використати первинні засоби пожежогасіння.

У разі травмування працівника:

- негайно зупинити обладнання.
- надати першу допомогу та викликати медичний персонал.
- повідомити керівника робіт.

Порядок дій при дронівому чи ракетному обстрілі, відповідно до рекомендацій ДСНС:

- при «Повітряній тривозі» негайно припинити роботу й перейти до укриття.
- уникати відкритих майданчиків, вибухонебезпечних зон та металевих конструкцій.
- повернутися до роботи лише після офіційного повідомлення про відбій тривоги.

#### **4.4 Висновки до розділу**

У розділі сформовано комплекс вимог з охорони праці під час роботи з аератором компостних буртів відповідно до чинного законодавства України. Визначено потенційні небезпечні фактори, засоби їх попередження, вимоги до ЗІЗ, порядок безпечної експлуатації та дій у разі аварійних ситуацій. Дотримання наведених норм дозволяє мінімізувати виробничі ризики, забезпечити безпечні умови праці та ефективну експлуатацію обладнання.

## 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР НАЙБІЛЬШ ЕКОНОМІЧНО ДОЦІЛЬНОГО ВАРІАНТУ

### 5.1 Вихідні дані

У цьому розділі визначається економічна оцінка кращих варіантів дослідів, які були обрані та описані в розділі 3.3. За результатами розрахунку оберемо один найкращий режим. Крім того приймаємо наступні значення:

- базова продуктивність аератора  $W = 112$  т/год;
- річний обсяг робіт:  $Q_p = 8950$  т;
- витрата палива:  $g_{пл} = 6,2$  кг/л;
- Ціна палива:  $C_{пл} = 58$  грн/л;

Витрата палива пропорційна навантаженню двигуна, яке характеризується силою струму на лабораторному стенді.

### 5.2 Розрахунок показників економічної ефективності

Тривалість роботи за рік визначається за формулою:

$$T_p = \frac{Q_p}{W} \quad (5.1)$$

Амортизаційні відрахування за рік:

$$C_a = k_a \cdot K_6 \quad (5.2)$$

$k_a$  – норма амортизаційних відрахувань;

$K_6$  – балансова вартість аератора;

Витрати на ремонт і ТО:

$$C_p = k_p \cdot K_6 \quad (5.3)$$

Витрати на оплату праці:

$$C_{зп}^p = C_{зп} \cdot T_p \quad (5.4)$$

Витрати на паливо:

$$g_{пл,i} = g_{пл} \cdot \frac{I_i}{1,25} \quad (5.5)$$

де  $g_{пл}$  – витрата палива в номінальному режимі,  $g_{пл} = 6,2$  кг/год.

Переведення кг/год в літри/год:

$$G_{л,i} = \frac{g_{пл,i}}{\rho_{пл}}, \quad (5.6)$$

де  $\rho_{пл}$  – густина дизелю, приймаємо 0,84 кг/л.

Вартість пального за годину визначається за формулою:

$$C_{пл,год,i} = G_{л,i} \cdot G_{пл}, \quad (5.7)$$

Вартість пального за рік визначається за формулою:

$$C_{пл,год,i} = C_{пл,год,i} \cdot T_p, \quad (5.8)$$

Загальні річні експлуатаційні та питомі витрати визначаються за формулою:

$$C_{експ}^{p,i} = C_{зп}^p + C_{пл}^{p,i} + C_a + C_p, \quad (5.9)$$

$$c_{експ,i} = \frac{C_{експ}^{p,i}}{Q_p}, \text{ грн/т} \quad (5.10)$$

Результати розрахунків занесемо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку

Показник	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Річний обсяг роботи, т	8950		
Тривалість роботи за рік, год	80		
Витрата палива, кг/год	6,2	6,74	7,01
Вартість палива, грн/рік	22816	24813	25760
Оплата праці, грн/рік	12000		
Амортизаційні витрати	9600		
Тех. обслуговування та ремонт	12000		
Питомі витрати, грн/т	6,3	6,52	6,63
Загальні експлуатаційні витрати	56416	58413	59360

Отже з економічної точки зору варіант 1 ( $\alpha = 4$  град;  $n = 160$  об/хв;  $v = 0,58$  м/с) є найбільш доцільним в практичних умовах.

## 5.2 Висновок до розділу

У даному розділі було виконано попередню економічну оцінку трьох найкращих режимів роботи аератора, визначених у ході лабораторних

досліджень. Розрахунки проводились за єдиними вихідними даними: річним обсягом робіт 8950 т, базовою продуктивністю  $W = 112$  т/год, реальною витратою палива з урахуванням навантаження двигуна та ринковою ціною пального.

Порівняння трьох режимів показало, що варіант 1 ( $\alpha = 4^\circ$ ,  $n = 160$  об/хв,  $v = 0,58$  м/с) забезпечує найменші експлуатаційні витрати, зокрема:

- найнижчу витрату пального;
- менші питомі витрати на 1 т обробленого матеріалу;
- найменшу суму річних експлуатаційних витрат.

Отже, з економічної точки зору саме варіант 1 є найбільш доцільним для практичного застосування, оскільки дозволяє мінімізувати паливні витрати та загальні щорічні витрати при збереженні стабільних технологічних показників формування компостного бурта.

Таким чином, результати економічного аналізу узгоджуються з отриманими у попередніх розділах даними та підтверджують ефективність обраного режиму роботи аератора.

## ВИСНОВОК

У роботі проведено комплексне експериментальне та чисельне дослідження процесу роботи аератора компостних буртів з метою визначення оптимальних параметрів, що забезпечують найкращу інтенсивність перемішування матеріалу та формування бурта при мінімальних енергетичних витратах.

За результатами чисельного моделювання, виконаного з урахуванням зміни густини матеріалу, частоти обертання барабана та швидкості руху агрегату, отримано три оптимальні режими процесу, що забезпечують максимальну висоту бурта  $H$  та високий коефіцієнт перемішування  $k$ , було встановлено, що збільшення густини матеріалу не знижує якість перемішування, тоді як швидкість руху та частота обертання впливають на рівномірність та величину підняття матеріалу вздовж лопаті.

Чисельне моделювання підтвердило, що найзначніший вплив на параметри бурта мають частота обертання  $n$  та швидкість руху  $V$ , тоді як густина матеріалу  $\rho$  у діапазоні 560–960 кг/м<sup>3</sup> не призводить до різкого погіршення структури бурта. Максимальна висота бурта  $H = 0,801$  м досягнута при комбінації:

Лабораторні дослідження, виконані для інших факторів ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $V$ ), підтвердили закономірності, отримані в чисельних моделях: зі збільшенням частоти та кута нахилу зростають навантаження на привід, що проявляється у збільшенні сили струму до 1,75 А, але не завжди приводить до покращення якості перемішування. Це дозволило поєднати результати моделювання та експерименту.

За результатами сумісного аналізу лабораторних і чисельних даних прийнято, що для подальших економічних розрахунків доцільно використовувати режим із максимальним значенням  $H$  та прийнятним енергоспоживанням.

Для економічної частини прийнято продуктивність аератора 112 т/год, річний обсяг роботи 8950 т, витрати палива за номінальних умов 6,2 кг/год, що адекватно описує реальний режим роботи агрегату.

У підсумку проведено економічне порівняння найкращих експериментальних режимів. За результатами розрахунків встановлено, що найекономічнішим режимом роботи є варіант з мінімальною витратою палива та найменшими експлуатаційними витратами - варіант 1, загальні річні витрати становлять 56 416 грн, питомі - 6,3 грн/т, що є найкращим серед досліджених варіантів.

У роботі доведено, що застосування чисельного моделювання дозволяє точно оцінити поведінку матеріалу у барабанному аераторі та визначити оптимальні режими роботи без значної кількості фізичних дослідів. Комбінація моделювання та експериментальних даних забезпечила високу достовірність результатів та дала можливість обґрунтувати оптимальний режим змішування як з технологічної, так і з економічної точки зору.

## Список використаних джерел

1. Тваринництво України 2011. Статистичний збірник. За редакцією Н.С. Власенко. Державна служба статистики України, 2012. 212 с.
2. Шевченко І. А. Результати експериментальних досліджень змішувача аератора компостів. Механізація, екологізація та конвертація біосировини в тваринництві: зб. наук. праць. Запоріжжя, 2011. № 2 (8). С. 80-88.
3. Техніко-економічна оцінка використання змішувача-аератора компосту. 5 стр. Аспірант Харитонов В.І.
4. Механізація виробництва продукції тваринництва / За ред. І. І. Ревенка. Київ: Урожай, 2004.
5. <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/10241-mekhanizovane-kompostuvannia.html>
6. <https://patents.google.com/patent/UA148110U/uk?q=UA148110U>
7. <https://patents.google.com/patent/US3369797A/en>
8. <https://patents.google.com/patent/US4478520A>
9. <https://patents.google.com/patent/EP1230196B1>
10. <https://patents.google.com/patent/WO1990013527A1/nl>
11. [https://mapiea.kntu.kr.ua/archive/39\\_I/39\\_I\\_Pavlenko.html](https://mapiea.kntu.kr.ua/archive/39_I/39_I_Pavlenko.html)
12. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7779.com>
13. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/1904021.com>
14. Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 Агроінженерія ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ, 2024. 64 с. Укладач: доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри інжинірингу технічних систем Ельчин АЛІЄВ
15. Методичні рекомендації до практичних занять з навчальної дисципліни «Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ, 2024. 257 с. Укладач:

доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри інжинірингу технічних систем Ельчин АЛІЄВ

16. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Статистична обробка експериментальних даних» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ, 2024. 257 с. Укладач: доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри інжинірингу технічних систем Ельчин АЛІЄВ

17. [https://uk.wikipedia.org/wiki/T-%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B9\\_%D0%A1%D1%82%D1%8C%D1%8E%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/T-%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B9_%D0%A1%D1%82%D1%8C%D1%8E%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0)

18. Удосконалення процесу проектування свиноферм в сучасних умовах / В. Ю. Дудін, І. О. Романюха, Л. О. Кіряцев, О. С. Гаврильченко, М. Г. Повод. Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. 2013. № 2. С. 72-75.

19. Дудін В. Ю. Огляд світових практик поводження з рідким гноєм та відповідної законодавчо-нормативної бази. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. 2019. Вип. 201: Інноваційні проекти у галузі технічного сервісу машин. С. 72-79.

20. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>

21. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>

22. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2075-12>

23. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text>

24. [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=68394](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68394)

25. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05#Text>

26. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text>

27. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Драгнев С. В., Баштовий А. І. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні. Промислова теплотехніка. 2018. Т.40, № 6. С. 68–74.

28. Відомчі норми технологічного проектування. ВНТП – АПК 02.02. Свинарські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми), Мінагрополітики України, К.: – 2002. – 97 с.

29. ДСТУ 4397: 2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 15 с.

30. Відродження органіки: свинячий гній. URL: <https://agbag.ua/advice/vidrozhennja-organiki-svinjachij-gnij> (дата звернення: 12.11.2025).

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
Кафедра механізації виробничих процесів у тваринництві

## **Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів обладнання для прискореного біотермічного компостування гною**

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24  
Жаріков Дмитро Олександрович

**Керівник:** к.т.н., доцент  
Дудін Володимир Юрійович

Дніпро-2025

### **Мета і задачі досліджень**

Метою дослідження є обґрунтування та встановлення раціональних конструкційно-технологічних параметрів лопатевого барабана аератора компостних буртів на основі чисельного моделювання та лабораторних досліджень, що забезпечують підвищення ефективності перемішування, однорідності суміші та стабільності сформованого бурта.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести огляд сучасних конструкцій аераторів та визначити технічні аспекти, що потребують уточнення.
2. Виконати чисельне моделювання перемішування та встановити вплив густини матеріалу, частоти обертання, швидкості руху та кута лопаток на формування бурта.
3. Провести лабораторні дослідження масштабованої моделі барабана та визначити залежності сили струму приводу й висоти бурта від режимних параметрів.
4. Порівняти результати моделювання та експерименту й встановити оптимальні режими роботи.
5. Розробити рекомендації з охорони праці при експлуатації аераторів.
6. Виконати техніко-економічне обґрунтування вибраного оптимального режиму.

Об'єкт дослідження — процес перемішування компостної суміші лопатевим барабаном.

Предмет дослідження — конструктивні та режимні параметри барабана, що визначають ефективність перемішування, однорідність суміші, висоту бурта та енергетичні витрати.

### Класифікація мобільних аераторів

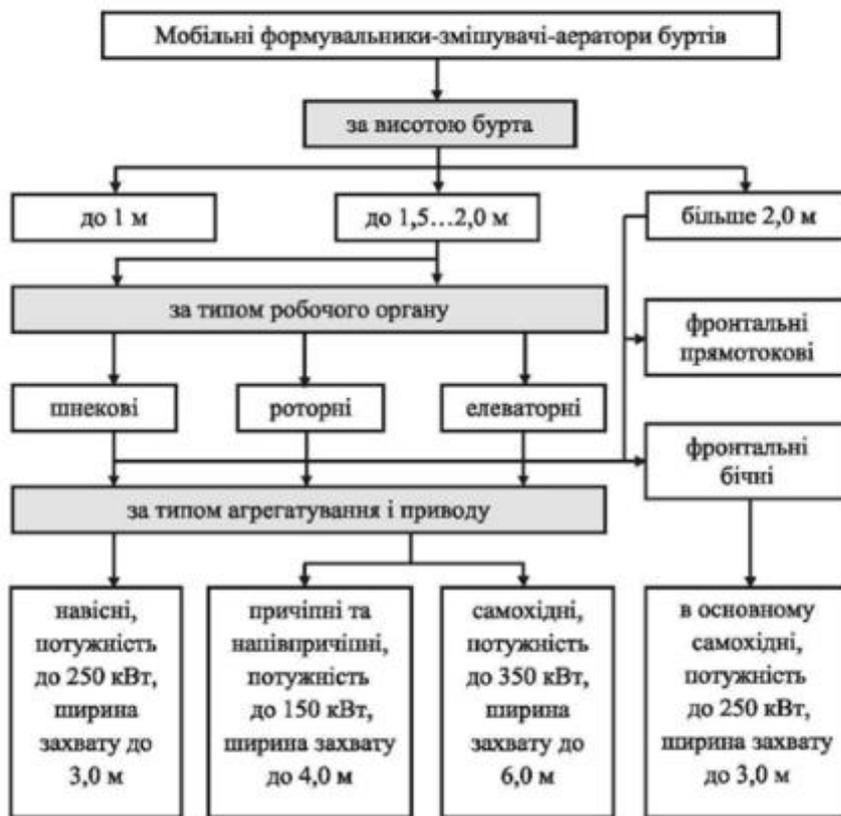


Рисунок 1 – Класифікація мобільних аераторів

3

### Огляд технічних засобів



А



Б



В



Г



Д



Е

Рисунок 2 – Приклади різновидів аераторів

4

## Прийнята конструкція

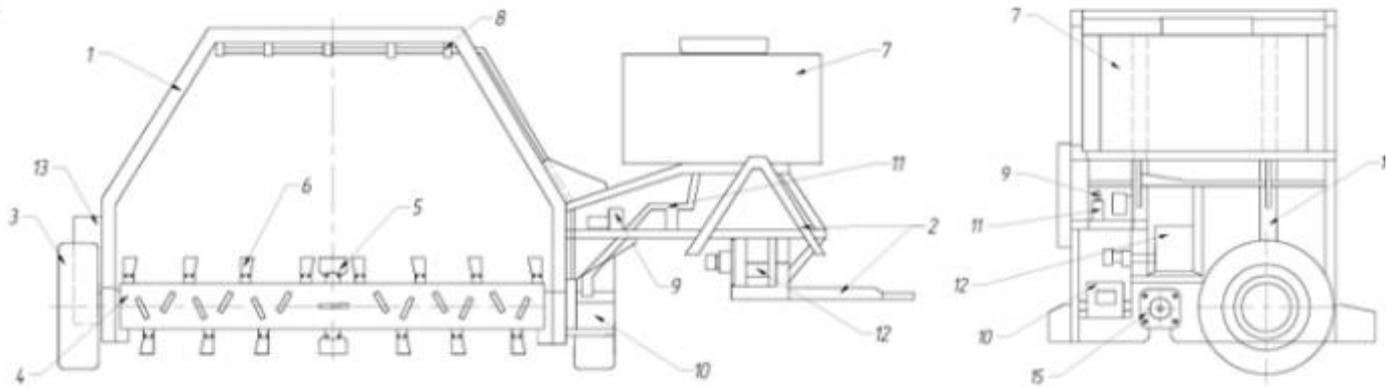


Рисунок 3 – Прийнята конструкція аератора

## Теоретичні дослідження

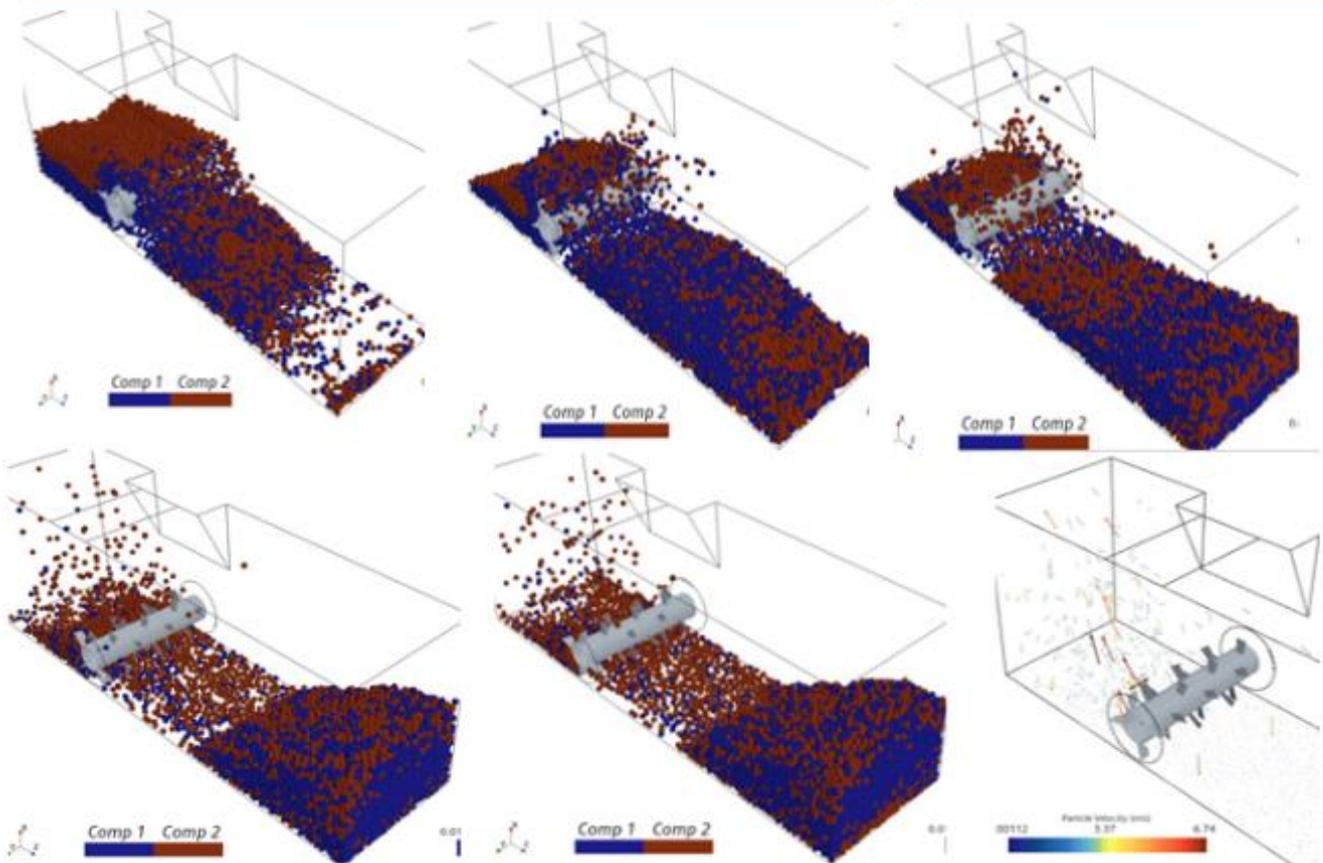
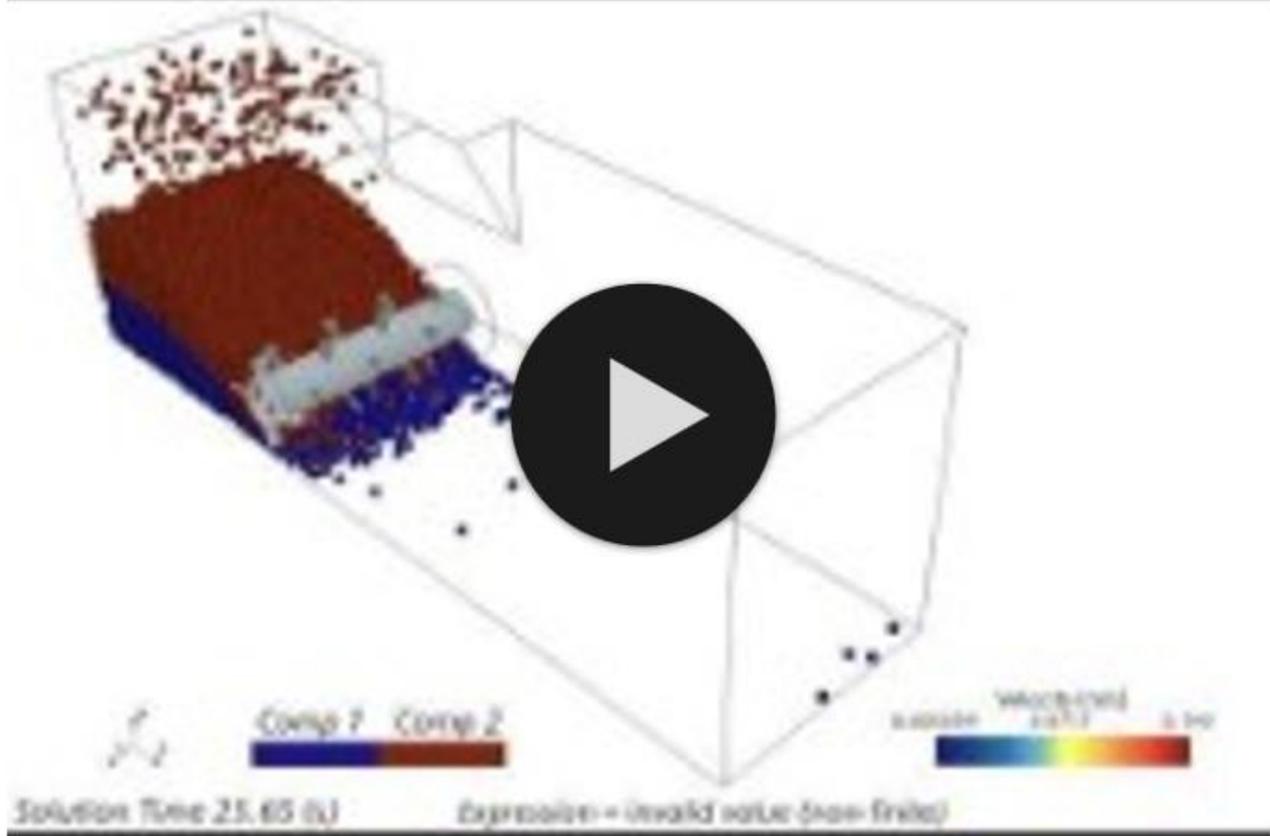


Рисунок 4 – Процес теоретичного дослідження



7

## Результати теоретичних досліджень

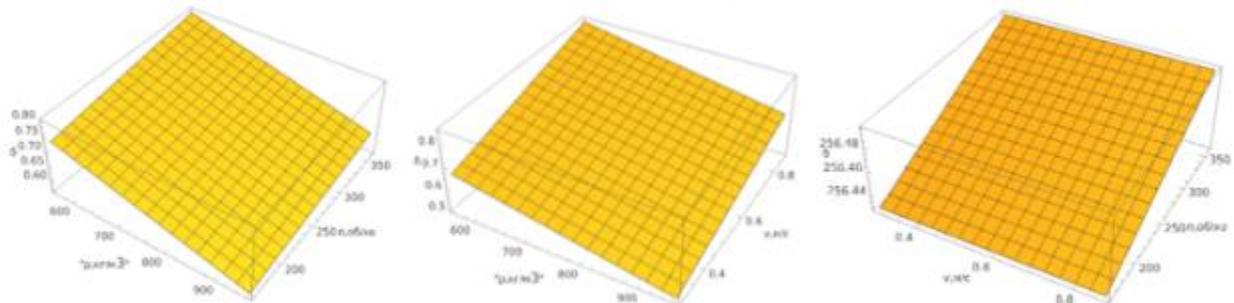


Рисунок 5 – Графічні залежності відносно k

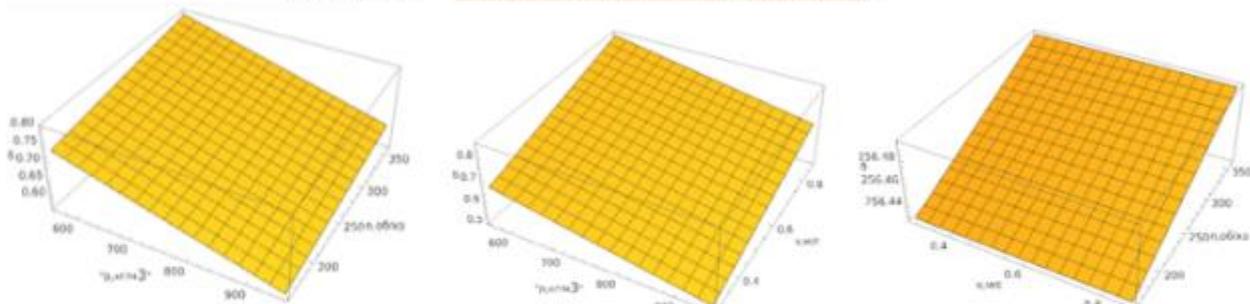


Рисунок 6 – Графічні залежності відносно H

Графічні залежності підтверджують, що густина матеріалу і швидкість руху мають найбільший вплив на ефективність формування бурта та якість перемішування.

8

## Результати теоретичних досліджень

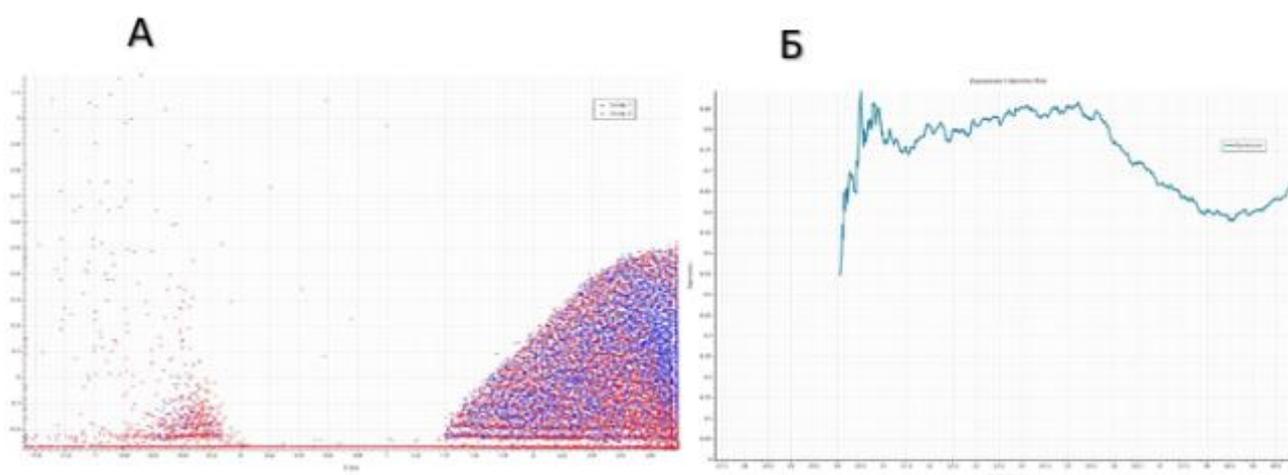


Рисунок 7 – Графічні залежності отриманні в результаті чисельного моделювання: А – розташування частинок; Б – графік зміни коефіцієнту однорідності

## Експериментальні дослідження

Таблиця 1 – Фактори, інтервали та рівні варіювання факторів

Фактори	Кодоване позначення	Інтервали варіювання	Рівні факторів		
			-1	0	+1
n – частота обертання барабану, об/хв	$x_1$	100	160	260	360
v – швидкість поступального переміщення аератора, м/с	$x_2$	0,29	0,29	0,58	0,87
$\alpha$ – кут установки лопатей, град	$x_3$	8	4	12	20

$$1.4 + 0.15 x_1 - 3.81198 \times 10^{-16} x_1^2 + 0.11 x_2 - 3.41222 \times 10^{-16} x_1 x_2 + 0.01 x_2^2 + 0.065 x_3 - 3.14903 \times 10^{-16} x_1 x_3 - 3.10472 \times 10^{-16} x_2 x_3 + 0.015 x_3^2$$

$$0.12 + 1.30841 \times 10^{-17} x_1 - 0.008 x_1^2 + 1.45266 \times 10^{-17} x_2 - 2.15155 \times 10^{-17} x_1 x_2 - 0.008 x_2^2 + 1.47976 \times 10^{-17} x_3 - 2.19477 \times 10^{-17} x_1 x_3 - 2.20278 \times 10^{-17} x_2 x_3 - 0.006 x_3^2$$

Рисунок 8 – Отримані рівняння регресії

## Експериментальні дослідження



Рисунок 9 – Фото експериментальної установки

10

## Результати експериментальних досліджень

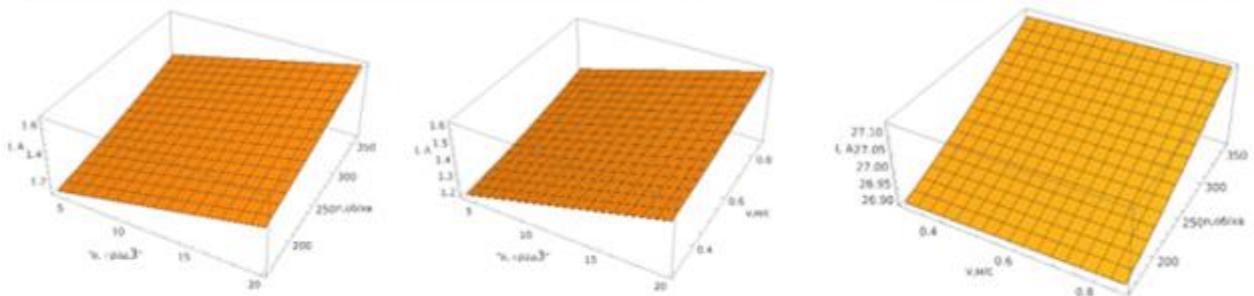


Рисунок 10 – Графічні залежності для сили струму А

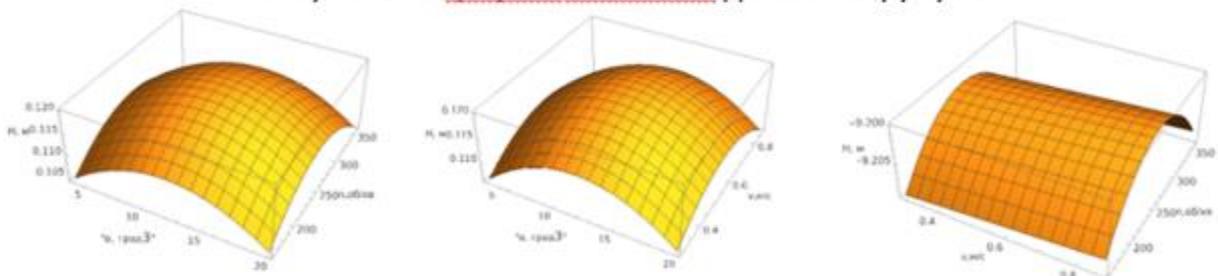


Рисунок 11 – Графічні залежності для висоти бурта Н

12

### Заходи по забезпеченню захисту оператора від дії шкідливих та небезпечних факторів

Під час експлуатації аератора необхідно забезпечити безпечні умови праці, мінімізуючи дію механічних, електричних та хімічних факторів. Працівники допускаються до роботи лише після інструктажу та проходження медичного огляду.

Перед запуском перевіряють технічний стан обладнання, наявність огорожень та справність електропроводки. Забороняється робота при виявленні несправностей, підвищеному шумі, вібрації або проникненні сторонніх предметів у робочу зону.

До обов'язкових засобів індивідуального захисту належать спецодяг, захисне взуття, окуляри, рукавиці та респіратор. Під час роботи в зоні аерації працівник зобов'язаний контролювати рівень пилу та газів, не перебувати поблизу рухомих елементів і не залишати машину без нагляду.

У разі аварійної ситуації (задимлення, обрив кабелю, витік рідини) обладнання негайно вимикають від живлення, працівники покидають небезпечну зону та повідомляють відповідальну особу.

До надзвичайних ситуацій належать пожежа та ракетний обстріл. У разі пожежі використовують первинні засоби гасіння та викликають відповідні служби. Під час повітряної тривоги роботу припиняють і переходять до укриття.

13

### Техніко-економічна оцінка

Таблиця 2 – Результати економічного розрахунку

Показник	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Річний обсяг роботи, т	8950		
Тривалість роботи за рік, год	80		
Витрата палива, кг/год	6,2	6,74	7,01
Вартість палива, грн/рік	22816	24813	25760
Оплата праці, грн/рік	12000		
Амортизаційні витрати	9600		
Тех. обслуговування та ремонт	12000		
Питомі витрати, грн/т	6,3	6,52	6,63
Загальні експлуатаційні витрати	56416	58413	59360

14

## Висновки

1. Проведено чисельне моделювання процесу формування бурта у Star-CCM+ для 27 комбінацій факторів: густини  $\rho = 560\text{--}960 \text{ кг/м}^3$ , частоти обертання  $n = 160\text{--}360 \text{ об/хв}$  та швидкості руху  $V = 0,29\text{--}0,87 \text{ м/с}$ . Встановлено, що коефіцієнт однорідності  $k$  змінюється в діапазоні  $0,52\text{--}0,90$ , а висота бурта  $H$  — у межах  $0,68\text{--}0,81 \text{ м}$ .

2. Показано закономірності впливу факторів:

- збільшення густини матеріалу з  $560$  до  $960 \text{ кг/м}^3$  зменшує  $k$  у середньому на  $25\text{--}30 \%$ ;
- збільшення частоти обертання з  $160$  до  $360 \text{ об/хв}$  знижує  $k$  у середньому на  $10\text{--}15 \%$ ;
- найстабільніші значення висоти бурта ( $H \approx 0,78\text{--}0,81 \text{ м}$ ) спостерігаються при швидкості  $V = 0,87 \text{ м/с}$  та густині  $560 \text{ кг/м}^3$ .

3. Встановлено найбільш оптимальні режими роботи аератора за даними моделювання/лабораторного дослідження:

$\rho, \text{ кг/м}^3$	$n, \text{ об/хв}$	$V, \text{ м/с}$	$k$	$H, \text{ м}$
560	160	0,87	0,877	0,801
760	160	0,87	0,803	0,782
960	260	0,58	0,672	0,783

$\alpha, \text{ град}$	$n, \text{ об/хв}$	$v, \text{ м/с}$	$I, \text{ А}$	$H, \text{ м}$
4	160	0,58	1,15	0,104
4	260	0,58	1,25	0,112
12	160	0,29	1,3	0,112

4. Зростання кута лопаток з  $4^\circ$  до  $20^\circ$  збільшує струм з  $1,1$  до  $1,75 \text{ А}$  ( $+59 \%$ ). Підвищення частоти обертання з  $160$  до  $360 \text{ об/хв}$  збільшує струм у середньому на  $28\text{--}35 \%$ .

5. Проведено економічний аналіз трьох найкращих режимів роботи та обрано найкращий варіант ( $\alpha = 4^\circ, n = 160 \text{ об/хв}, V = 0,58 \text{ м/с}$ ). Загальна економічна оцінка засвідчила, що обраний режим є найбільш доцільним для практичного впровадження й забезпечує оптимальне поєднання технічної ефективності та економічної вигідності.

6. Таким чином, у роботі отримано відповідність між результатами чисельного моделювання, експериментальних досліджень та економічного обґрунтування, що дозволило сформулювати чіткі рекомендації щодо раціональних режимів роботи аератора для формування компостних буртів.

# ДОПОВІДЬ ЗАКІНЧЕНО, ДЯКУЮ ЗА УВАГУ