

ДНІПРОВСЬКИЙ 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 аератора гною

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-1-24

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Огіль Віталій Сергійович

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**

Огілю Віталію Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів аератора 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 обробки гною. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання і завдання дослідження. 2. Теоретичні дослідження процесу аерації. 3. Експериментальні дослідження процесу аерації. 4. Охорона праці. 5. Економічне обґрунтування застосування аератора. Загальні висновки. Бібліографічний список

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (3 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (2 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: 24.12.2025 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)

Огіль В.С.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Дудін В.Ю.

_____ (прізвище та ініціали)

Огіль В.С. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів аератора гною/Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Проведено аналітичний огляд існуючих технологій утилізації гною, теоретично досліджено розподіл повітряного потоку в бурті, обґрунтовано крок розташування перфорованих труб і діаметр отворів уздовж труби. На лабораторній установці виконано багатофакторний експеримент за планом Бокса–Бенкіна; отримано регресійну модель, що пов'язує температуру в товщі бурта з числом рядів отворів та частотою обробок повітрям. Встановлено, що оптимальним є використання труби з одним рядом отворів, однократною обробкою на добу та не менше трьох обробок на тиждень. За таких режимів температура суміші зростає на 4–6 °С порівняно з традиційним буртуванням, забезпечується інтенсивніший розвиток термофільної мікрофлори та глибше обеззараження. Економічні розрахунки підтвердили доцільність впровадження установки завдяки зростанню вартості компосту як органічного добрива та короткому строку окупності.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем компостування гною на фермах різних масштабів.

Ключові слова: гній, компостування, бурт, штучна аерація, перфорована труба, термофільна мікрофлора, органічні добрива, економічна ефективність.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 Аналіз стану питання і завдання дослідження	11
1.1 Склад гною та його фізико-механічні властивості	11
1.2 Мікробіологічні основи компостування відходів тваринництва	18
1.3 Методи переробки гною / посліду та умови їх застосування	21
1.4 Основні напрями розвитку засобів механізації компостування	24
1.5 Висновки	31
2 Теоретичні дослідження процесу аерації	33
2.1 Опис робочого процесу штучної аерації соломо-гноювих сумішей	33
2.2 Теоретичні дослідження процесу розподілу повітряного потоку в об'ємі	36
2.3 Теоретичні дослідження властивостей повітряного потоку	39
2.4 Теоретичні дослідження витікання повітря з горизонтальних труб	42
2.5 Висновки	47
3 Експериментальні дослідження процесу аерації	49
3.1 Обладнання для проведення досліджень	49
3.2 Результати експериментальних досліджень	52
3.3 Висновки	56
4 Охорона праці	58
4.1 Загальні вимоги охорони праці при обробці гною	58
4.2 Оцінка з точки зору охорони праці розробленого аератора	59
4.3 Проект інструкції з охорони праці при роботі аератором	60
4.4 Висновки	62

5	Економічне обґрунтування застосування аератора	63
	Загальні висновки	65
	Бібліографія	67
	Додатки	75

ВСТУП

Сучасне тваринництво є одним з базових секторів аграрного виробництва України, але одночасно – потужним джерелом органічних відходів. При інтенсивних технологіях утримання великої рогатої худоби, свиней та птиці на фермах утворюються значні обсяги гною та посліду, які за відсутності належної системи утилізації спричиняють забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, погіршення санітарно-гігієнічного стану навколишнього середовища, викиди парникових газів і неприємний запах. Одночасно гній є цінною сировиною для отримання органічних добрив та поліпшення родючості ґрунтів, що особливо актуально в умовах подорожчання мінеральних добрив та орієнтації агропідприємств на екологічно безпечні технології.

Одним із найбільш поширених способів утилізації гною є компостування в буртах. Проте традиційні екстенсивні схеми буртування ґрунтуються переважно на природній аерації та теплоутворенні і потребують тривалого часу витримування – від кількох місяців до двох років. За таких умов важко забезпечити стабільну якість компосту, відбуваються значні втрати органічної речовини та азоту, зберігається ризик виживання патогенних мікроорганізмів і яєць гельмінтів. Тому актуальною науково-практичною задачею є інтенсифікація процесів біоферментації соломо-гною сумішей шляхом керованої подачі повітря до товщі бурта при мінімально можливих енергетичних витратах і трудомісткості.

Перспективним напрямом розв'язання цієї задачі є застосування штучної аерації буртів гною за допомогою компресорних установок і систем перфорованих трубопроводів. Такий підхід дає змогу створити всередині бурта сприятливі умови для розвитку аеробної термофільної мікрофлори, скоротити тривалість компостування, підвищити ступінь обеззараження та зберегти вміст поживних речовин у кінцевому продукті. Водночас вибір раціональної схеми подачі повітря, геометричних параметрів перфорованих труб і режимів роботи аератора потребує теоретичного обґрунтування та експериментальної перевірки.

З огляду на викладене тема магістерської дипломної роботи, пов'язана з розробкою та дослідженням установки штучної аерації соломо-гноювих буртів з порційною подачею повітря, є актуальною для сучасного тваринницького виробництва, відповідає завданням підвищення рівня екологічної безпеки та ресурсозбереження в аграрному секторі.

Мета роботи – підвищити ефективність аеробної обробки соломо-гноювих сумішей у буртах шляхом застосування штучної аерації з порційною подачею повітря та обґрунтувати конструктивно-режимні параметри установки аерації.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. На основі аналізу існуючих технологій та технічних засобів утилізації гною розробити принципову схему установки штучної аерації соломо-гноювих буртів з порційною подачею повітря.

2. Теоретично обґрунтувати параметри та режими роботи аератора, зокрема закони розподілу повітряного потоку в об'ємі бурта, оптимальний крок розташування перфорованих труб і діаметри отворів уздовж труби.

3. На основі лабораторних експериментів на дослідній установці обґрунтувати раціональні режими роботи аератора (кількість рядів отворів, кратність обробок за добу і за тиждень) із застосуванням методів математичного планування експерименту та статистичної обробки результатів.

4. Оцінити економічну ефективність впровадження розробленої установки в умовах тваринницького підприємства з урахуванням приросту вартості компосту як органічного добрива, експлуатаційних витрат та строку окупності капітальних вкладень.

Об'єкт дослідження – процес аеробного компостування соломо-гноювих сумішей у буртах.

Предмет дослідження – конструкція та параметри роботи установки штучної аерації буртів гною з порційною подачею повітря, а також їх вплив на тепловий та мікробіологічний режими компостування і якість одержаного органічного добрива.

У роботі використано методи аналізу та узагальнення літературних і патентних джерел, класичні положення гідрогазодинаміки та теорії подібності для теоретичного моделювання розподілу повітряного потоку, експериментальні дослідження на лабораторній установці з вимірюванням температурних полів, методи математичного планування експерименту (план Бокса–Бенкіна), регресійний аналіз, а також традиційні підходи до техніко-економічних розрахунків у сільськогосподарському виробництві.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні простої й енергоощадної установки для аерації гнойових буртів, яка дає можливість скоротити тривалість компостування, підвищити санітарно-гігієнічну безпеку та агрономічну цінність органічних добрив, а також може бути адаптована до різних масштабів тваринницьких господарств.

Магістерська робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі наведено аналітичний огляд стану питання утилізації гною та компостування, у другому – викладено теоретичні дослідження процесу аерації, у третьому – подано конструктивно-технологічну характеристику розробленого аератора, у четвертому – результати експериментальних досліджень і їх статистичну обробку, у п'ятому – економічне обґрунтування впровадження установки. Окремий підрозділ присвячено питанням охорони праці та безпеки при експлуатації аератора буртів.

1 Аналіз стану питання і завдання дослідження

1.1 Склад гною та його фізико-механічні властивості

У сільському господарстві застосовують понад дві сотні різновидів органічних добрив. Серед них провідне місце за значенням і обсягами використання займають різні види гною та посліду, торф, сидерати, компости, сіно і солома, сапропелі, зернова лузга, осади стічних вод тощо. Застосування органічних добрив сприяє підвищенню родючості ґрунтів, що особливо важливо для регіонів із низьким вмістом гумусу. Якщо врахувати сумарну кількість поживних речовин, що надходять у ґрунт з усіма видами добрив, частка органічних добрив становить приблизно 40 %.

Науково встановлено, що швидкість і повнота мінералізації органічної речовини в ґрунті істотно залежать від співвідношення вуглецю (C) та азоту (N). За співвідношення C:N не менше ніж 20:1 мікробіологічні та хімічні процеси протікають значно інтенсивніше. У таких умовах ґрунтові мікроорганізми активно розмножуються і частину азоту зв'язують у своїй біомасі, а в подальшому цей азот стає доступним для рослин.

Якщо ж співвідношення C:N менше ніж 14:1, у системі активно утворюється аміак унаслідок надлишку вільного азоту. Подібна ситуація виникає при інтенсивному застосуванні мінеральних добрив, особливо в поєднанні з внесенням рідкого гною з лагун. Таке «форсоване» землеробство може давати короточасне підвищення врожайності (як правило, протягом одного року), але водночас спричиняє деградацію ґрунтів і зниження їхнього природного родючості. Органічні добрива на основі соломо-гноювих сумішей, навпаки, покращують структуру ґрунту, сприяють накопиченню гумусу та підтриманню активної мікрофлори.

Енергетична цінність гною зумовлена наявністю в ньому органічних речовин – жирів, білків, полісахаридів та інших високомолекулярних сполук. У процесі зброджування ці речовини розкладаються з утворенням CO₂, H₂, H₂O та CH₄, що використовується, зокрема, в біогазових технологіях.

У твердих екскрементах великої рогатої худоби міститься в середньому 3,2 % загального азоту, 2,0 % фосфору та 3,1 % калію. У свиней відповідні показники становлять близько 5 %, 2,1 % і 2,5 %.

Розрахункові добові кількості та вологість екскрементів від однієї голови тварин різних статевих-вікових груп за умов годівлі свиней повнораціонними концентрованими кормами на свинокомплексах наведено в таблиці 1.1, а для підприємств з утримання великої рогатої худоби – у таблиці 1.2. Окремо виділяють навозні стоки, що утворюються на доільних майданчиках: їхня розрахункова кількість від однієї корови становить близько 20 л/добу, при цьому вміст екскрементів у стоках становить 2...3 % від їх середньодобового виходу.

Таблиця 1.1 – Добовий вихід екскрементів від однієї свині

Група тварин	Показник	Екскременти	Кал	Сеча
Хряки	Маса, кг	11,1	3,86	7,24
Хряки	Вологість, %	89,4	75,0	97,0
Свиноматки, холості	Маса, кг	8,8	2,46	6,34
Свиноматки, холості	Вологість, %	90,0	73,1	97,5
Свиноматки, супоросні	Маса, кг	10,0	2,6	7,4
Свиноматки, супоросні	Вологість, %	91,0	73,1	98,3
Свиноматки, підсисні	Маса, кг	15,3	4,3	11,0
Свиноматки, підсисні	Вологість, %	90,1	73,1	96,8
Поросята 26–42 діб	Маса, кг	0,4	0,1	0,3
Поросята 26–42 діб	Вологість, %	90,0	70,0	96,7
Поросята 43–60 діб	Маса, кг	0,7	0,3	0,4
Поросята 43–60 діб	Вологість, %	86,0	71,0	96,0
Поросята 61–106 діб	Маса, кг	1,8	0,7	1,1
Поросята 61–106 діб	Вологість, %	86,1	71,4	96,3
Свині на відгодівлі до 70 кг	Маса, кг	5,0	2,05	2,95
Свині на відгодівлі до 70 кг	Вологість, %	87,0	73,0	96,7
Свині на відгодівлі понад 70 кг	Маса, кг	6,5	2,7	3,8
Свині на відгодівлі понад 70 кг	Вологість, %	87,5	74,7	96,9

Примітки:

1. Загальну зольність екскрементів приймають на рівні 15 %, густину сухої речовини – 1400 кг/м³.

2. Кількість сечі на підприємствах із проектним поголів'ям орієнтовно становить 65 % від загальної маси екскрементів, а вміст сухої речовини в сечі – близько 17 % маси сухої речовини в екскрементах.

Таблиця 1.2 – Добовий вихід екскрементів від однієї тварини ВРХ

Група тварин	Показник	Екскременти	Кал	Сеча
Бики-плідники	Маса, кг	40,0	30,0	10,0
Бики-плідники	Вологість, %	86,0	83,0	95,0
Корови	Маса, кг	55,0	35,0	20,0
Корови	Вологість, %	88,4	85,2	94,1
Телята до 3 міс.	Маса, кг	4,5	1,0	3,5
Телята до 3 міс.	Вологість, %	91,8	80,0	95,1
Телята до 6 міс., на відгодівлі до 4 міс.	Маса, кг	7,5	5,0	2,5
Телята до 6 міс., на відгодівлі до 4 міс.	Вологість, %	87,4	83,0	96,2
Телята на відгодівлі 4–6 міс.	Маса, кг	14,0	10,0	4,0
Телята на відгодівлі 4–6 міс.	Вологість, %	87,2	83,5	96,5
Молодняк 6–12 міс. (телиці, нетелі)	Маса, кг	14,0	10,0	4,0
Молодняк 6–12 міс. (телиці, нетелі)	Вологість, %	87,2	83,5	96,5
Молодняк 12–18 міс. і нетелі	Маса, кг	27,0	20,0	7,0
Молодняк 12–18 міс. і нетелі	Вологість, %	86,7	83,5	96,0
На відгодівлі 6–12 міс.	Маса, кг	26,0	14,0	12,0
На відгодівлі 6–12 міс.	Вологість, %	86,2	79,5	94,1
На відгодівлі старше 12 міс.	Маса, кг	35,0	23,0	12,0
На відгодівлі старше 12 міс.	Вологість, %	84,9	80,1	94,2

Примітки:

1. Густина сухої речовини екскрементів ВРХ становить приблизно 1250 кг/м³, зольність сухої речовини – близько 16 %.

2. Кількість і вологість підстилкового гною від ВРХ визначають розрахунково залежно від умов утримання тварин, а також виду, початкової вологості та добової норми підстилки на одну голову.

Кількість посліду, що виділяється птицею за добу (залежно від виду та віку), наведена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Добовий вихід посліду птиці (залежно від виду і віку)

Вид і вікова група птиці	Вихід посліду, г/гол/добу	Розрахункова вологість, %	Об'ємна маса, т/м ³
Кури яєчні, батьківське стадо	189	71–73	0,6–0,7
Кури яєчні, промислове стадо	175	71–73	0,6–0,7
Кури м'ясні, батьківське стадо	276–300	71–73	0,6–0,7
Індички, дорослі	450	64–66	0,6–0,7
Качки, дорослі	423	80–82	0,7–0,8
Гуси, дорослі	594	80–82	0,7–0,8
Кури яєчні 1–4 тижні	24	66–74	0,6–0,7
Кури яєчні 5–9 тижнів	97	66–74	0,6–0,7
Кури яєчні 10–12 тижнів	176	66–74	0,6–0,7
Кури м'ясні 1–8 тижнів	140	66–74	0,6–0,7
Кури м'ясні 9–18(19) тижнів	184	66–74	0,6–0,7
Кури м'ясні 19(20)–26 тижнів	288	66–74	0,6–0,7
Індички 1–17 тижнів	378	70–72	0,6–0,7
Індички 18–33(34) тижнів	480	70–72	0,6–0,7
Гуси 1–3 тижні	330	76–78	0,7–0,8
Гуси 4–9 тижнів	480	76–78	0,7–0,8
Гуси 10–30(27) тижнів	195	76–78	0,7–0,8
Гуси 31(28)–34 тижні	495	76–78	0,7–0,8
Качки 1–7(8) тижнів	230	76–78	0,7–0,8
Качки 8(9)–21 тиждень	210	76–78	0,7–0,8
Качки 22–26 тижнів	234	76–78	0,7–0,8
Качки 8–21 тиждень (важкий крос)	234	76–78	0,7–0,8
Качки 22–28 тижнів (важкий крос)	253	76–78	0,7–0,8
Бройлери 1–8 тижнів (клітки)	135	66–74	0,6–0,7
Бройлери 1–9 тижнів (на підлозі)	158	66–74	0,6–0,7

Примітки:

1. Усушка посліду дорослих курей, індиків і молодняку старше 60 днів при клітковому утриманні має певні характерні значення через 12–13 год та 24–27 год після виділення.

2. Для молодняка курей та індиків віком 1–60 днів усушка посліду оцінюється через 12–16 год і 24–32 год.

3. При напільному утриманні дорослих курей та індиків і молодняку послід висихає приблизно наполовину від початкової маси; у качок – на 35 %.

4. Для розрахунку місткості сховищ посліду об'ємну масу приймають у межах 0,7...0,9 т/м³, зольність – близько 17,3 %, вологість – 55...60 %.

Співвідношення між хімічною потребою в кисні (ХПК) та масою органічної речовини, а також відношення п'ятидобової біохімічної потреби в кисні (БПК₅) і повної БПК до ХПК, а також БПК₅ до повної БПК для екскрементів свиней, ВРХ і пташиного посліду наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Співвідношення показників ХПК та БПК для різних видів екскрементів

Вид екскрементів	ХПК / маса органічної речовини	БПК ₅ / ХПК	БПК / ХПК	БПК ₅ / БПК
Свинячі	1,2	0,42	0,84	0,50
Екскременти ВРХ	1,4	0,12	0,3–0,4	0,36
Пташиний послід	1,7	0,22	0,43	0,50

Примітка: для свинокомплексів з повноцінною комбікормовою годівлею наведені орієнтовні значення; при іншому раціоні співвідношення показників уточнюють за хімічним аналізом екскрементів.

Суша речовина екскрементів на 75...85 % представлена органічними речовинами і лише на 15...25 % – золюю (мінеральною частиною). Органічна частина кала в основному складається зі сполук із високим вмістом вуглецю.

До фізико-механічних властивостей гною та посліду належать: об'ємна маса, вологість, липкість, температура саморозігрівання в товщі маси, температура промерзання, коефіцієнт тертя, текучість, в'язкість.

Вміст води істотно впливає на всі інші характеристики. Розрізняють відносну вологість і абсолютну (вологоутримання). У наукових дослідженнях і практиці найчастіше оперують відотною вологістю, що залежить від початкового стану гною/посліду, типу підстилки та способу видалення гною.

Якщо відносна вологість перевищує 80 %, для транспортування й видалення потрібні значно більші обсяги води. Підвищення вологості з 80 до 90 % приблизно у 2,25 раза збільшує витрати води.

Густина соломо-гноювих мас визначається густиною їхніх компонентів (сечі та твердих екскрементів), розміром утворених грудок, а також властивостями підстилкового матеріалу. Орієнтовні значення об'ємної маси основних видів гною наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Щільність основних видів гною, кг/м³

Вид гною	Тверді екскременти, кг/м ³	Суміш сечі та кала, кг/м ³
Гній ВРХ	530...890	1010...1020
Гній свиней	600...900	1050...1070
Гній овець	835...1250	1010...1020
Пташиний послід	–	700...1005

Залежно від технології утримання тварин, типу годівлі та прийнятої системи видалення гною з приміщень розрізняють: підстилковий, напіврідкий, рідкий гній та гноюві стоки. У випадку змішування гною з підстилкою маса стає більш пухкою, а в її товщі створюються сприятливі умови для інтенсивного перебігу біотермічних процесів.

Прийнято виділяти три ступені розкладання соломо-гноювих сумішей:

- свіжий гній;
- напівперепрілий;
- перепрілий (повністю розкладений) гній.

У свіжому, слаборозкладеному гної солома лише незначно змінює забарвлення і міцність. Водна витяжка має червонувато-жовтий або зеленуватий відтінок.

У напівперепрілому гної солома темно-коричнева, втрачає міцність і легко розривається. Порівняно зі свіжою масою напівперепрілий гній втрачає 10...30 % початкової маси та сухої органічної речовини. Водна витяжка з такого гною має чорний колір.

У перепрілому гної солома майже повністю мінералізована; окремі соломини не проглядаються, маса однорідна, чорна, мазка. Втрати початкової маси та сухої органічної речовини сягають близько 50 %. Водна витяжка з перепрілого гною практично безбарвна.

Підстилка істотно впливає на мікроклімат у тваринницькому приміщенні, на кількість та якість одержаного добрива. Вона поглинає вільну рідину з екскрементів і технологічної води, вбирає вологу та шкідливі гази, створює для тварин м'яке, тепле й відносно сухе ложе, покращує фізико-механічні та біологічні властивості гною. При цьому зменшується липкість маси, вона стає більш пухкою, що сприяє інтенсивному перебігу біотермічних процесів.

Як підстилкові матеріали застосовують солому, торф, полови, опале листя, мох, тирсу й стружку, зернову лузгу тощо. Підстилка додатково збагачує гній поживними речовинами для рослин (дані узагальнені в таблиці 1.6). Вологість підстилкового гною залежно від виду та кількості підстилки може досягати 85 %.

Напіврідкий гній – це суміш кала, сечі, залишків корму і технологічної води з вологістю близько 92 %. Рідкий гній містить певну кількість екскрементів, сена, води, кормових решток й інших включень, а його вологість перебуває в межах 92...97 %.

Таблиця 1.6 – Вміст поживних речовин у підстилковому матеріалі

Вид підстилки	H ₂ O, %	N, %	P ₂ O ₅ , %	K ₂ O, %	CaO, %	Поглинання H ₂ O, т/т	Поглинання NH ₃ , т/т
Солома злакових	14,3	0,5	0,25	1,0	0,3	1,8–3,0	0,8–3,7
Солома бобових	16	1,5	0,35	0,6	1,6	2,8–3,3	5–8
Торф низинний	25	2,3	0,26	0,15	3,0	4–7,5	8–18
Торф верховий	30	1,0	0,1	0,06	0,25	9–18	15–30
Листя деревне	14	1,1	0,25	0,3	2,0	2–4	0
Мох, тирса, стружка	25	0,2	0,3	0,74	1,08	4,2–4,5	2–4

Вихід підстилкового гною залежить від кількості використовуваної підстилки. Для соломи орієнтуються на те, що 1 частина повітряно-сухої соломи (вологість близько 14 %) може вбирати 2...3 частини вологи за масою.

Підстилка відіграє важливу роль в нарощуванні маси гною та підвищенні його якості. Вона покращує фізичні властивості добрива, вбирає сечу, поглинає аміак, зменшуючи втрати азоту. Найчастіше використовують солому злакових культур і торф, рідше – деревні стружки та тирсу. При збільшенні кількості підстилкового матеріалу зростає накопичення гною і знижуються втрати азоту під час зберігання. Зазвичай солому нарізають на довжину 9...15 см.

Торф містить у 3–4 рази більше азоту, ніж солома, та має значно вищу поглинальну здатність. Для підстилки рекомендують слабкорозкладений верховий моховий торф з вологістю 30...40 % і вмістом гуміфікованої органіки менше 20 %.

Тирса й стружки як підстилкові матеріали застосовуються обмежено, оскільки погіршують якість гною: такий гній містить менше азоту і повільніше розкладається.

Найціннішим видом органічного добрива вважають компост. Він постачає в ґрунт не лише поживні речовини, а й активну мікрофлору. У процесі масового розмноження мікроорганізмів структура і родючість ґрунту додатково поліпшуються. Особливо цінним є компост, у якому знищено патогенну мікрофлору та насіння бур'янів; для цього його необхідно готувати за спеціальною технологією.

Природне біологічне знезараження підстилкового й безпідстилкового гною та посліду, інфікованих неспорутворювальними збудниками (крім туберкульозу), відбувається за тривалої витримки – від 6 до 24 місяців. Такий метод потребує значних площ і часу. Перспективним є метод компостування з прискороною аеробною ферментацією.

Компостування здійснюється за участю бактерій, для життєдіяльності яких необхідні повітря, волога та певний температурний режим.

1.2 Мікробіологічні основи компостування відходів тваринництва

Природне розкладання відходів під час зберігання є біологічним процесом, який відбувається самочинно під дією мікрофлори, що міститься в гної та посліді.

У природних умовах цей процес проходить некеровано, тоді як в умовах промислового тваринництва він має бути контрольованим і керованим людиною, щоб забезпечити обробку та знезараження органічних відходів. Розуміння того, як різні фактори впливають на процес ферментації, дає змогу правильно проектувати відповідне обладнання. Системи переробки відходів тваринництва повинні забезпечувати обробку як твердих, так і рідких фракцій. Такі системи можуть бути аеробними, анаеробними, відкритого або закритого типу.

Усі види відходів тваринницьких підприємств (гній, послід, рідкі стоки) можуть перероблятися з доступом повітря (аеробні процеси) або без доступу кисню (анаеробні процеси). На практиці найчастіше застосовують аеробні способи обробки гною та посліду, оскільки вони є більш стабільними, передбачуваними, краще вивченими й менш тривалими за часом.

Для отримання біогумусу до гною додають торф, соломку, рослинні рештки або зернову лузгу. Зручним об'єктом для компостування є твердий підстилковий гній, який фактично являє собою готову соломо-гноюву суміш. Для напіврідких фракцій, що утворюються за безпідстилкового утримання великої рогатої худоби, свиней і птиці, необхідно додатково вносити рослинні компоненти для підвищення частки органічної речовини.

Біологічна ферментація, що лежить в основі компостування, – це процес розкладання органічних сполук під дією природної мікрофлори, яка надходить із навколишнього середовища або вже міститься в самому гної. Щоб керувати цим процесом і прискорювати його, слід створювати оптимальні умови для розвитку корисних мікроорганізмів.

Компостування можливе за наявності трьох обов'язкових складових: мікрофлори, вологи та кисню.

Важливий вплив на процес ферментації має співвідношення вуглецю (C) до азоту (N). Вуглець виступає «паливом» для енергетичних реакцій, а азот є основою для побудови клітинної структури мікроорганізмів. За нестачі азоту розвиток мікрофлори сповільнюється, відповідно зменшується швидкість ферментації. Надлишок азоту, навпаки, призводить до інтенсивного утворення аміаку та його похідних, що є небажаним як з екологічної, так і з технологічної

точки зору. Оптимальний вміст азоту відносно вуглецю вважається таким, коли частка азоту становить орієнтовно 3,8...4,8 %.

Процес ферментації соломо-гною суміші умовно поділяють на чотири послідовні стадії:

- мезофільна,
- термофільна,
- фаза охолодження,
- фаза дозрівання компосту.

На мезофільній стадії суміш поступово розкладається спочатку психрофільними бактеріями (робочий діапазон температур 5–20 °С), а потім мезофільними (20–40 °С).

Термофільна стадія характеризується активною діяльністю термофільної мікрофлори за температур вище 40 °С. За таких температур патогенна мікрофлора починає пригнічуватися. За сприятливих умов (насамперед за достатнього доступу кисню) температура в товщі компостної маси може досягати 55...70 °С. Після досягнення пікових температур основна частина мікроорганізмів гине, суміш поступово остигає, і настає стадія дозрівання компосту.

У процесі дозрівання соломо-гною суміш перетворюється на готовий компост, який перестає виділяти різкий неприємний запах і приваблювати мух та інших паразитів. Патогенні мікроорганізми, яйця та личинки гельмінтів гинуть, насіння бур'янів втрачає схожість.

Застосування штучної аерації (примусового нагнітання повітря) дає змогу інтенсифікувати природні процеси ферментації, надійно досягти верхньої межі термофільних температур і тим самим прискорити знезараження маси. В умовах активного вентилявання переважає розвиток аеробних та термофільних бактерій.

Виразне зниження температури компостної маси є ознакою завершення основної фази ферментації. Одночасно спостерігається зменшення загальної маси суміші, що пов'язано як із випаровуванням вологи, так і з мінералізацією та втратою частини органічної речовини у вигляді газоподібних продуктів.

1.3 Методи переробки гною / посліду та умови їх застосування

На сьогодні у світі розроблено й запроваджено понад два десятки технологій утилізації гною та посліду.

Основні напрями переробки гною в органічні добрива можна умовно поділити за видом вихідної сировини – твердий гній, напіврідкий та рідкий.

- Переробка твердого гною

Для твердих підстилкових гнойових мас застосовують такі технології:

- Компостування на відкритих майданчиках у суміші з вологопоглинальним матеріалом (солома, торф, рослинні рештки, тирса тощо). У цьому випадку формують бурти (поля компостування), періодично контролюють вологість і, за потреби, механічно перевертають масу.

- Компостування в біореакторах камерного або барабанного типу. Такі установки дають змогу створити більш керований режим: підтримувати оптимальну температуру, вологість та аерацію. Це прискорює дозрівання компосту, підвищує рівномірність якості добрива, зменшує втрати поживних речовин і скорочує площі, необхідні для компостування.

- Переробка напіврідкого та рідкого гною

Для напіврідкого та рідкого гною великої рогатої худоби та свиней застосовують інші підходи:

- Тривале витримування в гноєсховищах. Гній накопичують у спеціальних ємностях (лагунах, резервуарах), де він протягом тривалого часу піддається природним біохімічним процесам. Після витримування його використовують як рідке органічне добриво, вносячи на поля через систему розподілу гноївки.

- Технологія з розділенням на тверду і рідку фракції. За допомогою механічних сепараторів гній поділяють на:

- тверду фракцію, яку можна компостувати, сушити, гранулювати та використовувати як тверде органічне добриво або компонент ґрунтосумішей;

○ рідку фракцію, яка після додаткової біологічної обробки (аеробної чи анаеробної) може вноситися на поля як рідке добриво або частково повертатися в технологічний цикл (наприклад, як процесна вода).

Кожна з наведених технологій відрізняється за:

- потребою в капітальних вкладеннях;
- рівнем експлуатаційних витрат;
- трудомісткістю обслуговування;
- вимогами до площі та інфраструктури;
- екологічними характеристиками (ризик забруднення ґрунту, повітря, води).

Тому при виборі конкретного рішення сільськогосподарські підприємства й фермерські господарства повинні враховувати як економічні можливості, так і екологічні вимоги, умови утримання тварин, наявні земельні ресурси, а також структуру рослинницької галузі господарства.

У скороченому вигляді класифікацію технологій видалення, зберігання, обробки та використання гною і посліду доцільно подавати у вигляді блок-схеми (рисунок 1.1), де послідовно показані етапи:

- видалення гною з приміщень (механізоване, гідрозмив, скреперні установки тощо);
- транспортування до місць зберігання або переробки;
- зберігання (гноєсховища, лагуни, траншеї, бурти);
- обробка (компостування, біоферментація, сепарація, аерація, анаеробне зброджування);
- кінцеве використання (внесення як добрива, виготовлення ґрунтосумішей, отримання біогазу тощо).
- Перспективна технологія: примусова аерація компостних буртів

За результатами аналізу сучасних рішень однією з найбільш перспективних та енергоефективних технологій є метод примусової аерації гнойових буртів (штучна вентиляція маси під час компостування).

Сутність методу:

- у товщі гнойового бурта прокладають повітропроводи або перфоровані труби;
- за допомогою вентиляторів у масу подається повітря, що забезпечує достатню концентрацію кисню в усьому об'ємі;
- підтримується інтенсивний розвиток аеробних бактерій, у результаті їх життєдіяльності маса швидко нагрівається до 60...70 °С;
- за таких температур відбувається загибель більшості патогенних мікроорганізмів, яєць і личинок паразитів, пригнічується життєдіяльність бур'янів (насіння втрачає схожість);
- протягом 1...3 місяців гній переходить у стан стабільного, практично знезараженого органічного добрива – перегною.

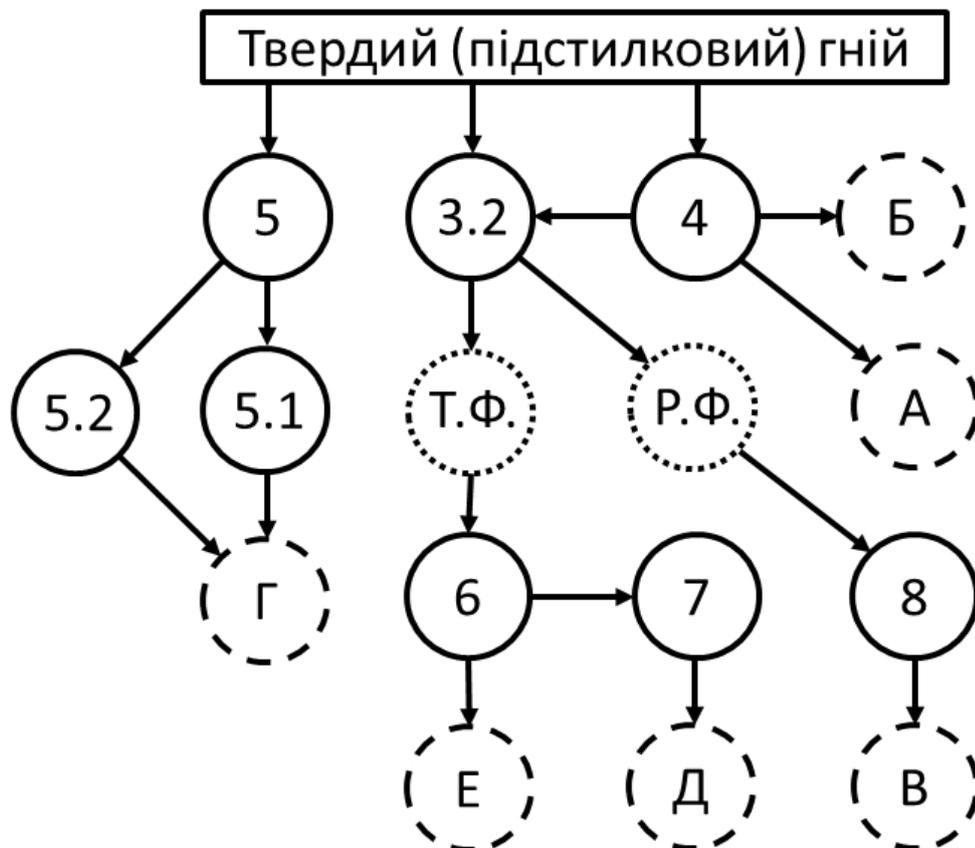


Рисунок 1.1 - Технології переробки твердого гною: 3 – розділення (3.2 – механічне); 4 – анаеробне зброджування; 5 – компостування (5.1 – природне, 5.2 – прискорене); 6 – сушіння; 7 – гранулювання; 8 – відстоювання; Б – біогаз; В –

технічна вода; Г – тверді органічні добрива (компост); Д – гранули (паливо, добрива); Е - підстилка

Основні переваги примусової аерації:

- значне прискорення процесу компостування порівняно з природним дозріванням;
- зменшення площ, необхідних для компостних майданчиків;
- відсутність потреби регулярно ворошити всю масу бурта важкою технікою;
- відсутність потреби у дорогих гербіцидах, пестицидах і значних дозах мінеральних добрив для корекції процесу;
- зниження негативного впливу на довкілля (менші викиди запахів, більш повне знезараження, менший ризик забруднення ґрунтових вод).

Таким чином, примусова аерація компостних буртів може розглядатися як одна з ключових технологій екологічно безпечної та економічно доцільної переробки гною і посліду на сучасних тваринницьких підприємствах.

1.4 Основні напрями розвитку засобів механізації компостування

Для біоферментації відходів тваринництва в господарствах різних форм власності нині широко застосовують буртування та компостування на накопичувальних майданчиках.

1) Буртування

Буртування – це традиційний спосіб переробки відходів тваринництва, особливо характерний для невеликих фермерських господарств. Підстилковий гній укладають у бурти й зберігають просто неба. Виділяють три основні різновиди буртування: аеробне, анаеробне та комбіноване.

Аеробне буртування

За аеробного способу гній/послід укладають у бурти без ущільнення. Соломо-гноюва маса швидко нагрівається завдяки активній роботі аеробної

мікрофлори. Однак запас кисню всередині бурта швидко вичерпується, життєдіяльність бактерій сповільнюється, процес ферментації затухає.

Наслідки:

значні втрати азоту (можуть досягати близько третини від його початкового вмісту);

втрати органічної речовини – до 40 %;

погана керованість процесу та нестабільна якість добрива.

Через це чисто аеробний спосіб буртування застосовують рідко.

Анаеробне буртування

За анаеробного способу гній чи послід укладають у бурти пошарово з обов'язковим ущільненням кожного шару.

Рекомендовані розміри бурта:

– висота – близько 2,5 м;

– ширина – близько 4,0 м.

Висока густина соломо-гноймової суміші знижує вміст кисню в товщі маси. Робочі температури зазвичай не перевищують 20...30 °С, біохімічні процеси відбуваються повільно, але при цьому зменшуються втрати органічних речовин.



Рисунок 1.2 – Компостування на польових майданчиках.

Тривалість анаеробного компостування значна – від кількох місяців до 1–2 років залежно від умов і вимог до кінцевого продукту.

Комбіноване буртування

Комбінований спосіб поєднує переваги аеробного й анаеробного варіантів.

Схема:

1. На першому етапі підстилковий гній / послід укладають у бурт без ущільнення, забезпечуючи інтенсивний доступ повітря й нагрівання маси.

2. Після досягнення підвищених температур бурт ущільнюють. Геометричні розміри роблять подібними до анаеробного способу.

3. Верх бурта вкривають шаром торфу або соломи. Це зменшує втрати аміачного азоту та захищає від надмірного випаровування.

4. Вологість контролюють; за її нестачею додають гноївку чи рідкий гній.

Комбінований спосіб забезпечує:

- інтенсивний початковий нагрів;
- подальше зменшення втрат органічних речовин і азоту;
- формування більш якісного й стабільного компосту.

2) Компостування

Компостування – це процес переробки та утилізації рідкого, напіврідкого та підстилкового гною/посліду шляхом змішування його з органічними наповнювачами (торф, солома, тирса, рослинні рештки, пташиний послід тощо) та подальшої ферментації.

Суміш можуть закладати:

- у компостні бурти на відкритих майданчиках;
- у спеціальні машини чи біоферментатори.

Розрізняють два основні підходи: пасивне (традиційне) та активне (ускорене) компостування.

Пасивне (традиційне) компостування

Технологія подібна до аеробного буртування на накопичувальних майданчиках під відкритим небом.

Умови роботи:

- тривалість процесу – від 1–3 місяців до 1–2 років залежно від схеми;

- ефективна ферментація можлива за температури зовнішнього повітря не нижче приблизно $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- за зниження температури в бурті виконують ворошіння для відновлення аерації.
- Пасивний метод включає:
 - ретельне змішування компонентів (гній/послід + торф, солома тощо);
 - формування буртів та витримування суміші;
 - періодичну аерацію (ворошіння) і подальше зберігання готового компосту.

Недоліки пасивного компостування:

- значна тривалість процесу;
- потреба у великих спеціально обладнаних компостних майданчиках;
- помітні викиди парникових і шкідливих газів (метан, аміак, сірководень);
- втрати до 40 % азотовмісних сполук, що знижує агрономічну цінність компосту;
- підвищені витрати на утримання та ремонт техніки, що працює на буртах.

Проста реалізація – довготривале (до 24 місяців) компостування гною з вологопоглинальними матеріалами на бетонованих або спеціально підготовлених польових майданчиках.

Пошарове та осередкове компостування гною з торфом

У практиці застосовують два основних варіанти розміщення гною/посліду та торфу в буртах: пошарове та осередкове компостування.

- Пошарове компостування
 - Формують бурт шириною близько 4...5 м.
 - Спочатку по всій ширині й довжині укладають шар торфу товщиною до 50 см, який виконує роль фільтра й бар'єра, що перешкоджає просочуванню гноївки в ґрунт.
 - Наступним шаром укладають гній/послід.
 - Шари торфу та гною чергують доти, доки висота бурта не досягне 1,5...2 м.

– Верхній шар обов'язково роблять торф'яним, щоб зменшити втрати аміачного азоту.

Товщина шарів залежить від обраного співвідношення гною/посліду й торфу. Наприклад, за співвідношення 1:1 товщина кожного шару може становити 25...30 см. За більшої частки торфу його шари роблять відповідно товщими.

Осередкове компостування

За цього способу гній/послід розміщують усередині бурта торфу суцільною «стрічкою» або окремими осередками.

Спочатку укладають шар торфу товщиною 50...60 см. Потім зверху, уздовж середини бурта, формують шар гною/посліду завтовшки 70...80 см і дещо вужчий за торф'яний шар (приблизно на 1,0...1,5 м). Якщо кількість гною/посліду обмежена або використовують безпідстилковий рідкий гній, його розміщують у вигляді окремих «осередків», які з усіх боків обкладають торфом шаром 50...70 см.

Осередковий спосіб особливо доцільний у районах із холодною зимою. У таких буртах навіть взимку температура в центральній частині, як правило, не опускається нижче 25...30 °С, що забезпечує продовження процесів ферментації.

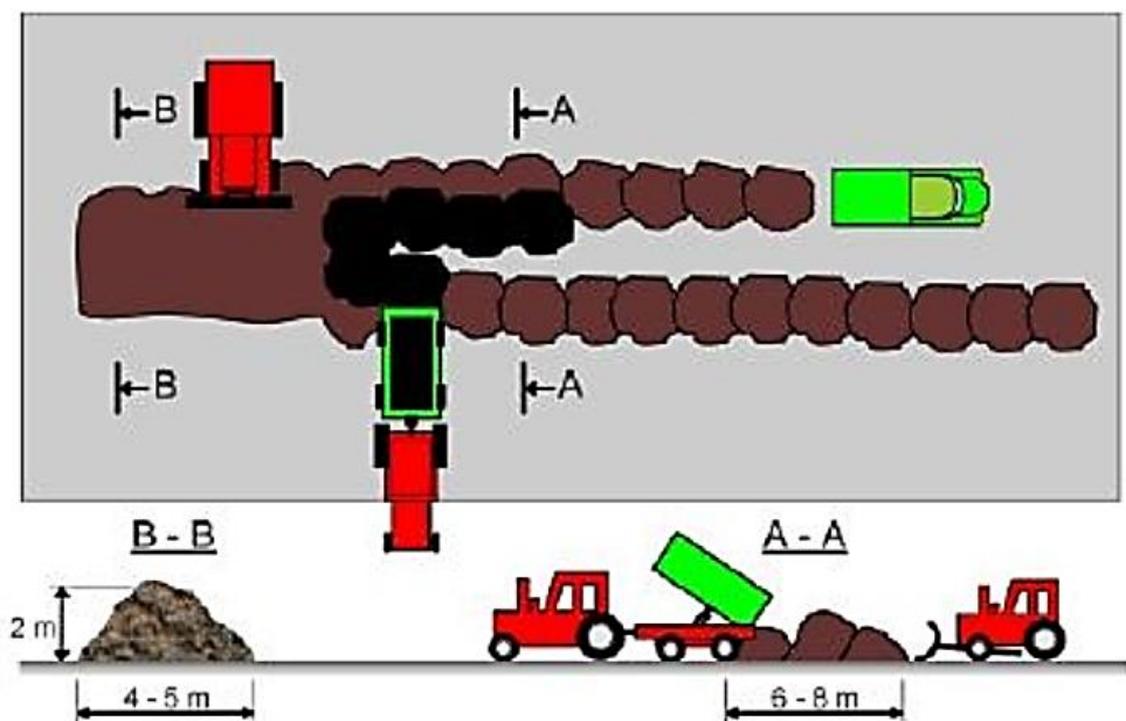


Рисунок 1.4 – Схема компостування напіврідкого гною / посліду

Для формування торфо- або соломо-гноєвих компостів торф чи солому розкладають у вигляді двох суміжних валів так, щоб між ними утворилося заглиблення. У місці дотику валів товщина шару становить близько 35...40 см. У це заглиблення подають гній/послід (у тому числі напіврідкий), після чого масу формують у бургт.

Компостування гною з торфом дає змогу:

- зменшити втрати азоту;
- перевести частину азотовмісних сполук у більш доступну для рослин форму;
- отримати структурований, агрономічно цінний компост за умови підтримання температури в межах приблизно 60...65 °С.

Активне (прискорене) компостування

Активний спосіб передбачає:

- використання спеціальних біопрепаратів (мікробіологічні закваски);
- або проведення процесу в теплоізольованих біоферментаторах різних конструкцій (камерні, тунельні, барабанні тощо).



Рисунок 1.4 – Машини для виконання робіт з компостування на відкритих (польових і прифермерських) майданчиках: а – машина-буртоукладач на базі ПРТ-7; б – фронтальний навантажувач.

У біоферментаторах:

- забезпечується контрольована подача повітря (періодична або безперервна);
- підтримуються підвищені температури на рівні 70...80 °С;

- компостування триває від 3 до 7 діб;
- втрати поживних речовин обмежуються орієнтовно 15–20 %.

Така технологія дає змогу отримати стабільний, незаражений компост за значно коротший термін.

Механізація компостування на спеціалізованих майданчиках.

На спеціалізованих майданчиках для компостування твердого гною/посліду або їх сумішей з вологопоглинальними матеріалами використовують:

- розкидачі-буртоукладачі типу РОУ-6, ПРТ-7, ПРТ-10 – для формування буртів і попереднього змішування;
- фронтальні навантажувачі – для переміщення маси, формування й переформування буртів;
- спеціалізовані ворошители буртів (наприклад, машин фірм EcoBridge, «Амкодор»).

Ворушилки забезпечують:

- регулярне перемішування маси;
- посилену аерацію;
- більш рівномірний розподіл температури й вологи в бурті.



а



б

Рисунок 1.5 – Ворушники буртів: а – фірми EcoBridge; б – фірми Амкодор.

У процесі компостування досягається:

- знезараження матеріалу;
- зниження вологості та усунення різкого запаху;

- збільшення об'ємної маси (коефіцієнт ущільнення зростає з $\approx 0,4$ до $0,6 \dots 0,8$);
- можливість періодичного або безперервного «досипання» свіжої маси;
- довготривале (6...8 місяців) зберігання готового компосту до моменту внесення в ґрунт.

Таким чином, розвиток засобів механізації компостування спрямований на скорочення термінів переробки, зниження втрат поживних речовин, підвищення якості добрив і мінімізацію негативного впливу на довкілля.

1.5 Висновки

Критичний аналіз існуючих технологій, технічних засобів та наукових розробок у сфері утилізації й переробки відходів тваринництва дав змогу дійти таких узагальнень:

У кожній із застосовуваних нині технологій переробки гною та посліду залишаються невирішені технічні й технологічні недоліки, які суттєво обмежують їхню ефективність.

Особливого значення набувають мікробіологічні методи, що базуються на використанні природних процесів перетворення відходів тваринництва на компости, придатні для сільськогосподарського використання.

Традиційні, переважно екстенсивні підходи до переробки гною (буртування, звичайне компостування) потребують тривалих строків витримки — до двох років — і не забезпечують гарантовано стабільної якості одержуваного компосту.

Мета роботи – підвищити результативність аеробної обробки соломо-гноювих сумішей у буртах шляхом застосування штучної аерації за умов порційної (дозованої) подачі повітря.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

На основі аналізу наявних технологічних рішень та обладнання для утилізації гною розробити принципову схему установки штучної аерації соломо-гноювих сумішей із порційною подачею повітря.

Провести теоретичне обґрунтування основних конструктивно-технологічних параметрів і режимів роботи установки штучної аерації соломо-гноювих сумішей із дозованою подачею повітря.

Виконати мікробіологічні та гельмінтологічні дослідження соломо-гноювої суміші в процесі компостування для оцінювання ступеня знезараження та знищення патогенної мікрофлори й інвазійних елементів.

За результатами лабораторних досліджень встановити раціональні режими функціонування лабораторної установки штучної аерації соломо-гноювих сумішей із порційною подачею повітря.

Оцінити економічну доцільність і ефективність упровадження установки штучної аерації соломо-гноювих сумішей із порційною подачею повітря в умовах виробничого використання.

2 Теоретичні дослідження процесу аерації

2.1 Опис робочого процесу штучної аерації соломо-гноювих сумішей

Штучна аерація соломо-гноювих сумішей, укладених у бурт і накритих плівкою, є відносно простим, але досить ефективним способом прискорення ферментації та зниження енерговитрат, пов'язаних із ворошінням буртів.

У відомих конструкціях аераторів підстилкового гною подавання повітря здійснюють за допомогою напірних вентиляторів (осьових або відцентрових), які подають повітря через систему повітряних каналів і трубопроводів. Спільним суттєвим недоліком таких систем є недостатня ефективність компостування. Безперервна подача повітря призводить до:

- надмірної витрати повітря та його безкорисного викиду в атмосферу;
- зростання енергоспоживання;
- труднощів при роботі з буртами, герметично накритими плівкою (гній, пташиний послід), оскільки тиск може пошкоджувати покриття.

Поставлене інженерне завдання полягало в тому, щоб підвищити ефективність компостування буртів, накритих плівкою, за рахунок аерації без використання складних і енергоємних способів механічного перемішування буртової маси.

Запропоноване рішення базується на порційному поданні повітря в бурт за допомогою агрегату, що поєднує компресор і ресивер. Компресор забезпечує нагнітання повітря. Ресивер накопичує повітря і створює потрібний надлишковий тиск, достатній для проникнення повітря в усю товщу соломо-гноювої суміші.

Агрегат з'єднується з системою перфорованих трубопроводів через колектор і гнучкий повітряний шланг із запірним вентилям. Така схема дає змогу здійснювати дозовану, імпульсну подачу повітря одночасно до всіх труб, задіяних в аерації бурта. Це сприяє рівномірнішій обробці всієї маси гною.

Верхню частину бурта підстилкового гною можна герметично накрити повітронепроникним матеріалом (плівкою). У такому випадку в товщі соломо-

гноювої суміші підтримуються сприятливі умови для розвитку аеробної мікрофлори, що прискорює процес ферментації.

- Надлишковий тиск, створений у ресивері, забезпечує:
- протискання повітря крізь перфоровані труби, укладені в нижній частині бурта;
- рівномірний розподіл повітряного потоку по їх довжині;
- проникнення повітря в усю товщу соломо-гноювої маси.

Швидке зниження тиску після стравлювання повітря з ресивера не призводить до пошкодження плівкового укриття, оскільки максимальні значення тиску діють нетривалий час. Під плівкою формується своєрідний «повітряний мішок», що створює оптимальні умови для активної життєдіяльності аеробних (у тому числі термофільних) мікроорганізмів. Це дає змогу суттєво підвищити температуру соломо-гноювої суміші, прискорити її ферментацію, а також забезпечити знезараження від насіння бур'янів, патогенної мікрофлори та гельмінтів.

Такий спосіб порційної аерації може використовуватися: як із плівковим укриттям бурта, так і без нього, а також у разі часткового пошкодження плівки.

Проте за відсутності герметичного покриття необхідно збільшувати кількість циклів подачі повітря, щоб компенсувати його вихід у навколишнє середовище.

Окрему роль відіграє конструкція перфорованих труб. Діаметри повітродувних отворів у них підбирають з урахуванням: діаметра труби; швидкості повітряного потоку на вході; розташування отворів уздовж труби.

Отвори розміщують: із постійним кроком уздовж осі труби; у поперечному перерізі — під кутом 90° один до одного (тобто по колу); з поступовим збільшенням діаметра отворів у напрямку руху повітряного потоку.

Таке конструктивне виконання забезпечує: більш рівномірний розподіл повітря вздовж труби; подачу повітря як по горизонталі, так і по вертикалі в межах бурта; підвищення ефективності аерації всієї маси суміші. У товщі соломо-гноювої маси, укладеної в бурт на компостному майданчику, монтують перфоровані труби.

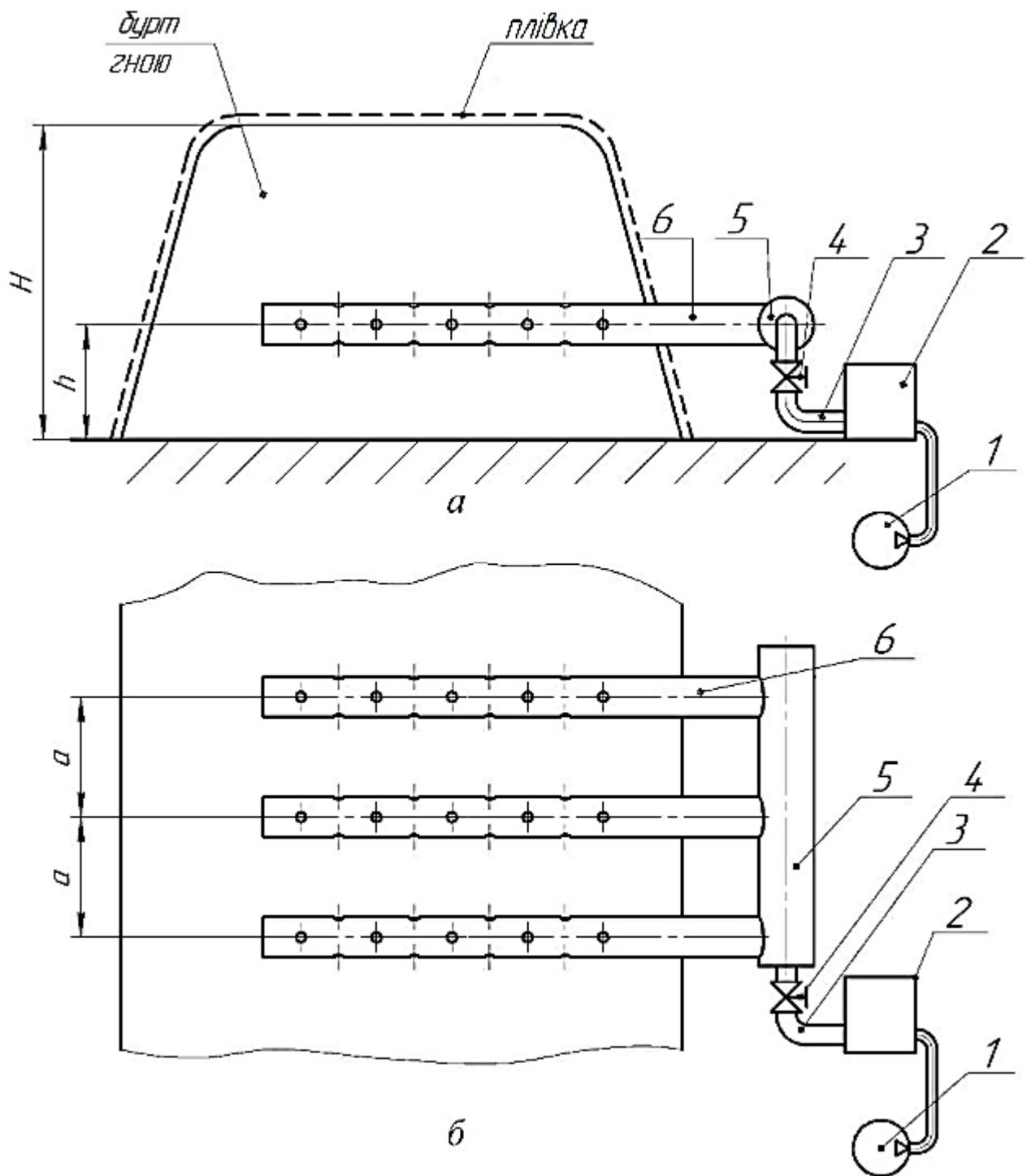


Рисунок 2.1 - Схема роботи аератора: 1 – компресор; 2 – ресивер; 3 – гнучкий повітряний шланг; 4 – вентиль; 5 – колектор; 6 – перфоровані трубопроводи

Труби під'єднують до колектора, який через вентиль і гнучкий шланг з'єднаний із ресивером компресора. Компресор нагнітає повітря в ресивер до заданого надлишкового тиску. Після вимкнення компресора відкривають вентиль,

і повітря порційно подається з ресивера через шланг і колектор у перфоровані труби.

У просторі під плівковим укриттям створюється невеликий надлишковий тиск, повітря не одразу виходить в атмосферу, а проходить через масу гною, підтримуючи активну аеробну мікрофлору.

Використання такого аератора дає змогу: суттєво прискорити компостування соломо-гноювих сумішей; одночасно забезпечити їх знезараження за рахунок розвитку термофільної аеробної мікрофлори; відмовитися від механічного перемішування та ворошіння бурта; уникнути залучення складної й дорогої спеціальної техніки; знизити експлуатаційні витрати завдяки порційній, а не безперервній подачі повітря.

2.2 Теоретичні дослідження процесу розподілу повітряного потоку в об'ємі

Для аналізу витікання повітря з отворів повітророзподільної труби прийнято узагальнене припущення: рух повітря розглядається за аналогією з рухом рідини, а відповідні рівняння гідравліки використовуються як наближений опис газодинамічних процесів.

Рівномірний розподіл повітря в об'ємі соломо-гноювої суміші можна звести до задачі мінімізації «мертвих» (необроблених) зон у товщі бурта, куди повітря практично не надходить. На рисунку 2.3 наведено схему витікання повітряних потоків із отворів у трубі. Форма струменя на виході з отвору має вигляд конуса з кутом при вершині α (кут розкриття конуса).

Форму та розміри цих конічних потоків змодельовано в програмному комплексі КОМПАС з використанням розрахункового модуля KompasFlow (розділ гідрогазодинаміки). Утворені конічні струмені повітря перетинаються на певній висоті h , що залежить від кроку розміщення отворів t та кута розкриття конуса α .

Зв'язок між кроком розташування отворів t і висотою h перетину конусів описується виразом (2.1):

$$h = \frac{t}{2} \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right). \quad (2.1)$$

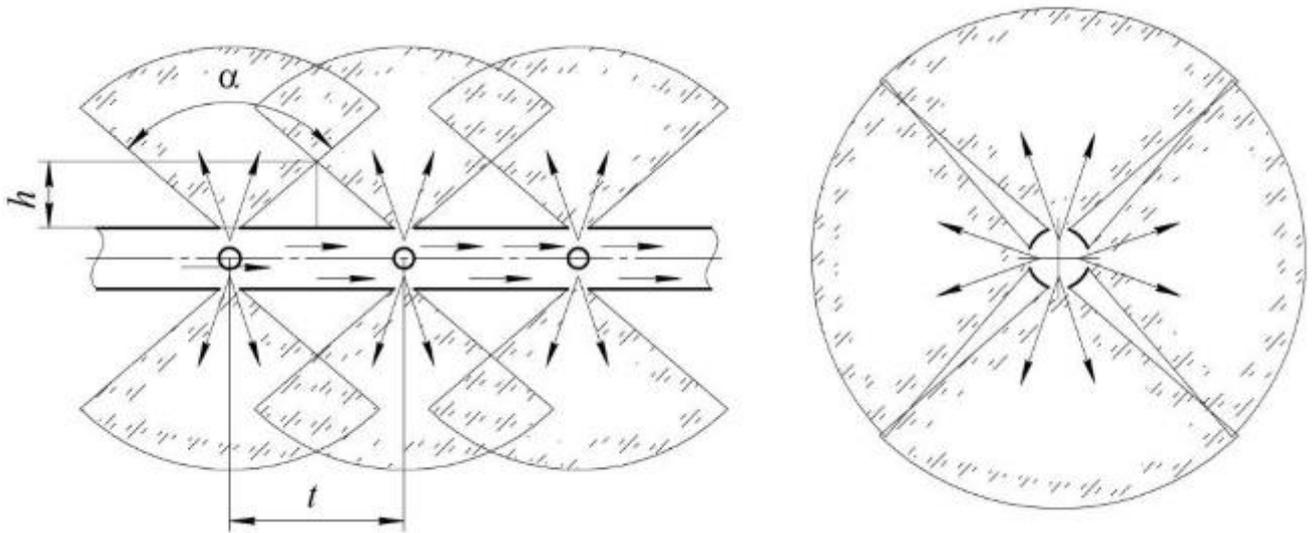


Рисунок 2.2 – Схема розподілу повітря в повітродувній трубі

Щоб мінімізувати висоту зони, яка не продувається повітрям, і забезпечити максимально рівномірну аерацію по всій товщі бурта, крок розташування отворів t доцільно приймати сталим.

У розглянутих трубах отвори виконані по периметру поперечного перерізу з кутовим кроком 90° . Таке розташування додатково сприяє рівномірному розподілу повітря в об'ємі бурта. Далі визначимо крок розташування перфорованих труб a . На рисунку 2.4 показано взаємне розміщення двох труб у горизонтальній площині (вид зверху).

Крок a має бути таким, щоб кінчні струмені повітря від двох сусідніх труб перетиналися в точках перетину конусів, які виходять із сусідніх отворів одного ряду труби.

Розглянемо перетин конусів від двох отворів, розташованих поруч в одному ряду. Відрізок OC (див. схему) дорівнює половині кроку розташування труб $a/2$ і визначається як сума відрізків (2.2):

$$OC = OK + KC \quad (2.2)$$

Із прямокутного рівнобедреного трикутника ΔOAB маємо (2.3):

$$OK = AK = \frac{d}{2} \cos 45^\circ = \frac{d\sqrt{2}}{4}. \quad (2.3)$$

де d – діаметр труби.

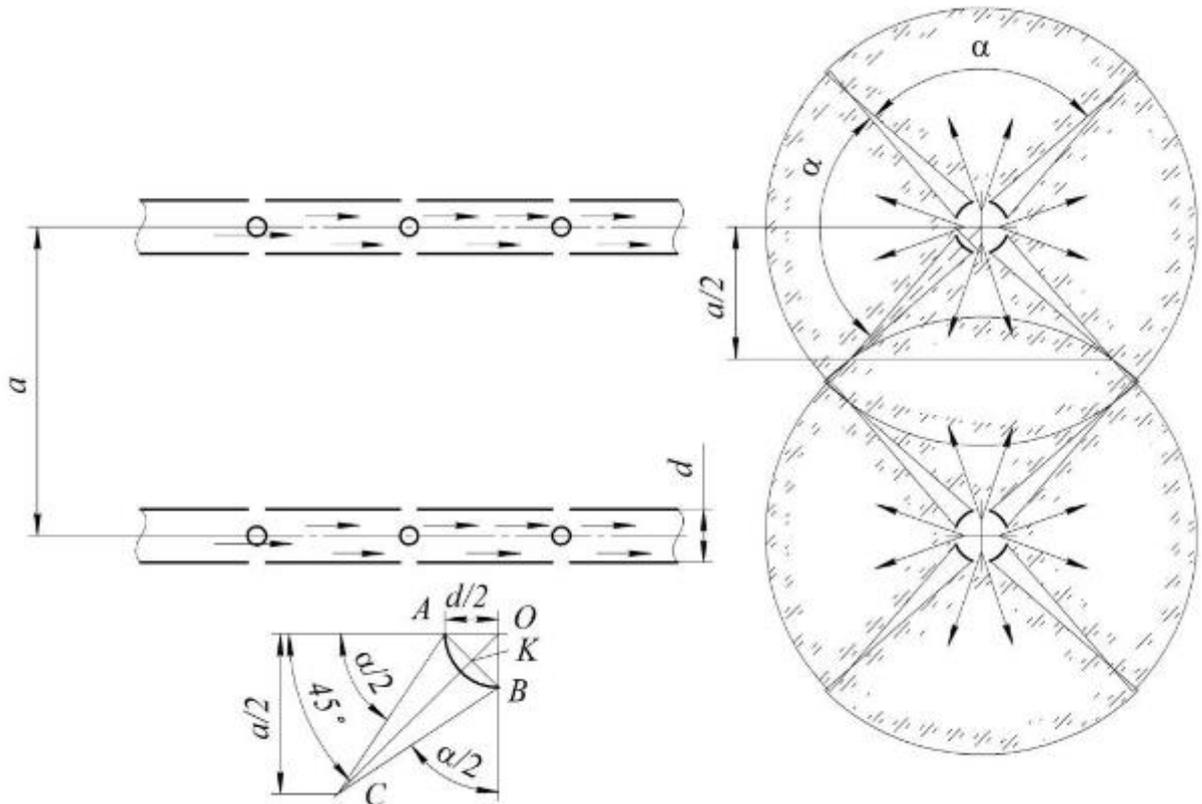


Рисунок 2.3 – Схема розташування труб у горизонтальній площині

З прямокутного трикутника ΔAKC (2.4):

$$KC = AK \cdot \operatorname{tg} \left(180^\circ - 45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{d\sqrt{2}}{4} \operatorname{tg} \left(135^\circ - \frac{\alpha}{2} \right). \quad (2.4)$$

Підставляючи (2.2) і (2.3) у (2.1) та враховуючи, що $a = 2 \cdot OC$, одержуємо (2.5):

$$a = \frac{d}{4} \left(1 + \operatorname{tg} \left(135^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) \right). \quad (2.5)$$

Цей вираз має фізичний зміст за умови, що кут розкриття конуса $\alpha > 90^\circ$.

Числовий приклад: при діаметрі труби $d = 50$ мм і швидкості повітряного потоку $12,4$ м/с у модулі KompasFlow отримано кут розкриття $\alpha = 91,5^\circ$. Для висоти конусів $h = 0,2$ м за формулою (2.1) маємо:

$$t = 2h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) = 2 \cdot 0,2 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{91,5^\circ}{2} \right) = 0,430 \text{ м.}$$

У подальших розрахунках приймаємо:

– крок отворів уздовж труби: $t = 0,45 \dots 0,5$ м;

– крок розташування перфорованих труб: $a = 0,95 \dots 1,0$ м.

2.3 Теоретичні дослідження властивостей повітряного потоку

Згідно з основами газодинаміки повний тиск у повітряному потоці є функцією густини середовища:

$$p = f(\rho). \quad (2.6)$$

Для опису руху повітря за сталої температури (ізотермічний процес) використовують рівняння Клайперона:

$$p = \rho_m R T,$$

де p – тиск повітря, Па;

ρ_m – молярна густина повітря, моль/м³;

R – універсальна газова стала);

T – абсолютна температура, К.

Рівняння нерозривності потоку для стисливого середовища можна записати у вигляді (2.7):

$$\frac{d\rho}{dx} + \frac{d(\rho v_x)}{dx} + \frac{d(\rho v_y)}{dy} + \frac{d(\rho v_z)}{dz} = 0 \quad (2.7)$$

Систему рівнянь Ейлера для проєкцій швидкості можна подати у вигляді (2.8):

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dx} + v_x \frac{dv_x}{dx} + v_y \frac{dv_x}{dy} + v_z \frac{dv_x}{dz} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx}, \\ \frac{dv_y}{dx} + v_x \frac{dv_y}{dx} + v_y \frac{dv_y}{dy} + v_z \frac{dv_y}{dz} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dy}, \\ \frac{dv_z}{dx} + v_x \frac{dv_z}{dx} + v_y \frac{dv_z}{dy} + v_z \frac{dv_z}{dz} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Повітря доцільно розглядати як в'язке стисливе середовище, що має внутрішнє тертя з динамічним коефіцієнтом в'язкості μ (Па·с) та кінематичним коефіцієнтом в'язкості $\nu = \mu/\rho$. З урахуванням стисливості вводиться також другий коефіцієнт в'язкості ξ :

$$\xi = \lambda + \frac{2}{3}\mu.$$

Модуль Юнга для в'язкого стисливого середовища може бути записаний у вигляді (2.9):

$$E = \mu \frac{(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad (2.9)$$

Коефіцієнт Пуассона для такого середовища визначається за формулою (2.10):

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (2.10)$$

Закон Н'ютона для в'язкого тертя встановлює зв'язок між дотичними напруженнями τ та градієнтом швидкості (2.11):

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial n}, \quad (2.11)$$

Якщо розглядати потік як ізотропне середовище (властивості однакові в усіх напрямках), тензор дотичних напружень у власних осях можна записати у вигляді (2.12):

$$\begin{cases} \tau_1 = \lambda_1(e_1 + e_2 + e_3) + 2\mu_1 e_1, \\ \tau_2 = \lambda_2(e_1 + e_2 + e_3) + 2\mu_1 e_2, \\ \tau_3 = \lambda_3(e_1 + e_2 + e_3) + 2\mu_1 e_3, \end{cases} \quad (2.12)$$

У векторному вигляді рівняння Нав'є–Стокса для в'язкого стисливого газу можна подати так (2.13):

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \frac{\lambda + \mu}{\rho} \text{grad}(\text{div}\vec{v}) + \frac{\mu}{\rho} \Delta\vec{v}, \quad (2.13)$$

Проектуючи (2.13) на координатні осі, для повітря як стисливого в'язкого газу одержуємо (2.14)–(2.16). Спочатку рівняння нерозривності у диференціальній формі:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0. \quad (2.14)$$

а також рівняння для проєкцій швидкості:

$$\frac{dp}{dt} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0,$$

$$\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda + \mu}{\rho} \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) +$$
(2.15)

$$\frac{dv_z}{dt} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\lambda + \mu}{\rho} \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) +$$

$$+ \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right).$$
(2.16)

Наведені залежності дають змогу досліджувати рух повітряного потоку з урахуванням його в'язких властивостей, внутрішнього тертя та стисливості, а також використовувати ці результати для оптимізації режимів аерації соломогноювих сумішей у буртах.

2.4 Теоретичні дослідження витікання повітря з горизонтальних труб

Потік повітря з ресивера надходить у перфоровану трубу, з якої далі витікає через повітродувні отвори. Розглянемо математичну модель витікання повітря через отвори перфорованої горизонтальної труби. Повітря подається в трубу з одного кінця через повітряний шланг, другий кінець труби заглушений. Тиск повітряного потоку з часом зменшується від p_0 до $p_{\text{атм}}$ у процесі спорожнення ресивера. На бічній поверхні труби розташовані ряди отворів із постійним кроком t , який було визначено раніше. Необхідно з'ясувати умови, за яких витрата повітря, що виходить із кожного отвору, буде однаковою (рисунок 2.4).

Після заповнення ресивера та вимкнення електродвигуна компресора повітря починає надходити в перфоровану трубу. Введемо вісь x , яка збігається з віссю труби. На вході в трубу (у місці підведення повітряного шланга) координата дорівнює $x_0 = 0$, а швидкість повітря позначимо v_0 . Повітроподавальна труба має постійний круговий переріз площею S (рисунок 2.5).

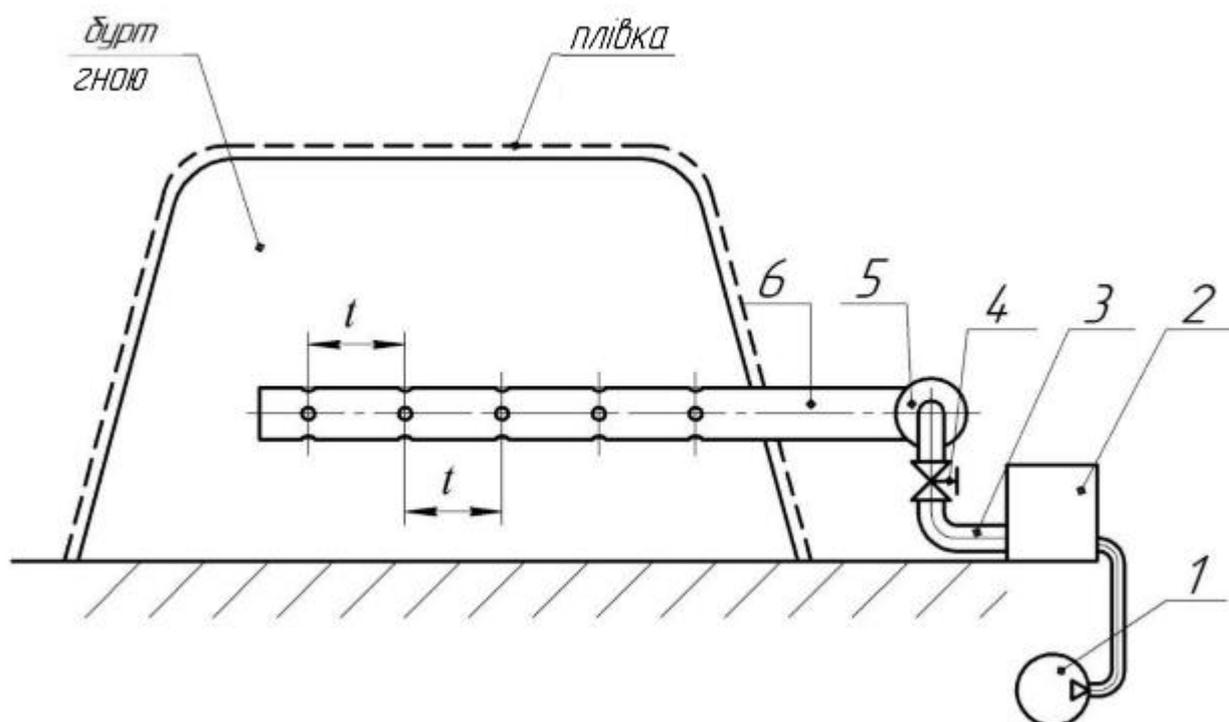


Рисунок 2.4 – Розміщення повітродувної труби в бурті та крок розташування отворів

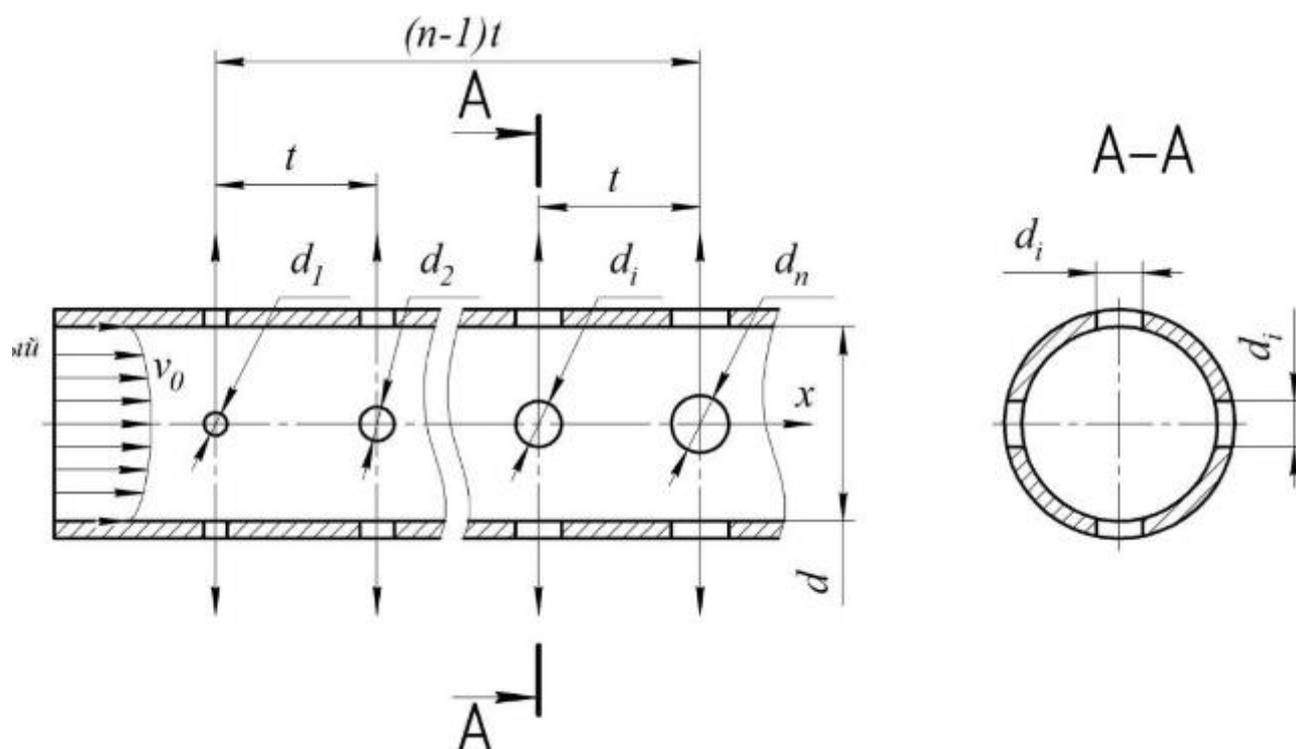


Рисунок 2.5 – Розрахункова схема труби для моделі витікання повітря з отворів

На вході в трубу об'ємна витрата повітря визначається як:

$$Q = Sv_0 = 0,25\pi d^2 v_0.$$

Сумарна витрата повітря через усі отвори дорівнює об'ємному потоку на вході. При цьому припускаємо, що витрата через кожен отвір однакова. Тоді можна записати (2.17):

$$S_i v_i = \frac{0,25\pi d^2 v_0}{n}. \quad (2.17)$$

де n – кількість рядів отворів;

S_i – площа перерізу i -го отвору, м^2 ;

v_i – швидкість витікання повітря з i -го отвору, м/с ;

d – діаметр перфорованої труби.

Тиск стисливого баротропного газу (повітря) пов'язаний з його густиною та температурою співвідношенням:

$$p = \frac{R\rho T}{\mu},$$

Де ρ – густина повітря, кг/м^3 ;

μ – молярна маса повітря, кг/моль ;

R – універсальна газова стала, $\text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}$;

T – абсолютна температура, К .

Вісь x збігається з напрямком потоку повітря в трубі. Тоді рівняння нерозривності та рівняння Ейлера у проєкції на цю вісь матимуть вигляд (2.18), (2.19):

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad (2.18)$$

$$\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = F - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.19)$$

Під силою F розуміють питомий зовнішній рушійний вплив від надлишкового тиску повітря в ресивері, що можна подати як відношення сили до маси переміщуваного газу.

На вході в трубу задаються початкові умови: $v(t = 0) = v(x = 0) = v_0$; $p(x = 0) = p_0(t)$.

Унаслідок втрат на в'язке тертя тиск у трубі в напрямку до заглушеного кінця зменшується. Дисипативні сили тертя можна записати через коефіцієнти λ та μ , що характеризують зміну напружень залежно від деформацій:

$$F_{\text{тр}} = \frac{2\mu + \lambda \partial^2 v_x}{\rho \partial x^2} + \frac{\mu + \lambda \partial \bar{v}_x}{2\rho \partial x},$$

де \bar{v}_x – середня інтегральна швидкість потоку повітря в трубі.

З урахуванням тертя рівняння (2.19) можна переписати у вигляді:

$$\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = F - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2\mu + \lambda \partial^2 v_x}{\rho \partial x^2}.$$

Коли повітряний потік ударяється об глухе днище, що закриває другий кінець труби, виникає його відбиття та локальне підвищення тиску. Хвиля підвищеного тиску поширюється у зворотному напрямку (аналог гідравлічного удару). Оскільки швидкість повітря в трубі істотно менша за швидкість звуку, процес можна вважати квазістаціонарним. Швидкість поширення хвилі деформації (стиснення) у газі визначають за формулою:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}},$$

де γ – показник адіабати.

Тоді систему (2.18), (2.19) можна звести до наступного вигляду (2.20):

$$\begin{aligned}v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} &= F - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} &= -\frac{v_x}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}.\end{aligned}\tag{2.20}$$

Систему рівнянь (2.20) було розв'язано чисельним методом у середовищі Mathcad. Після апроксимації результатів одержано емпіричне рівняння для розподілу швидкості повітряного потоку вздовж труби (м/с):

$$v(x) = \frac{v_0}{\sqrt{1 + \frac{2,26x}{21-x}}}\tag{2.21}$$

Далі визначимо залежність діаметрів отворів у перфорованій трубі від їхнього розташування. З умови (2.7) з урахуванням (2.21) маємо:

$$\frac{1}{n} S_0 v_0 = S_i v_i, \text{ или } \frac{1}{n} d^2 v_0 = d^2(x) v(x).$$

Звідси одержуємо:

$$d(x) = \frac{d}{\sqrt{u(x)n}}\tag{2.22}$$

де $d(x)$ – залежність діаметра отвору від його розташування вздовж труби;

d – діаметр перфорованої труби;

$u(x)$ – безрозмірна функція швидкості повітряного потоку, що визначається

як

$$u = \frac{v(x)}{v_0}.$$

Для наочного контролю правильності розв'язку рівнянь (2.21) і (2.22) будують графіки залежностей швидкості повітряного потоку та діаметрів повітродувних отворів як функцій координати x уздовж труби (рисунок 2.6).

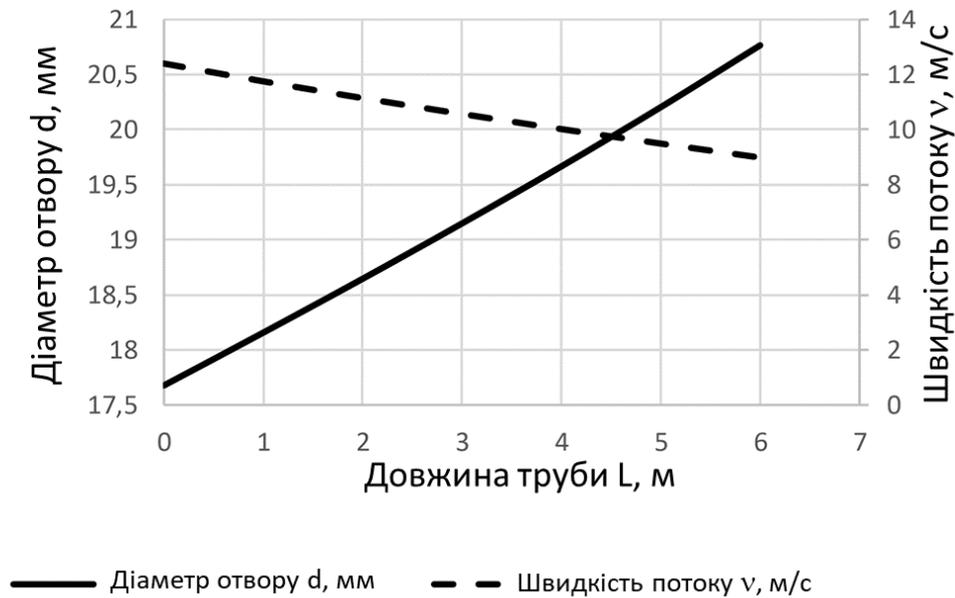


Рисунок 2.6 – Графіки теоретичних залежностей швидкості повітряного потоку та діаметра отворів від довжини труби

Швидкість потоку в напрямку до заглушеного кінця труби зменшується нелінійно, за гіперболічним законом, у межах від 12,4 до 8,6 м/с при довжині труби 6 м. Рівномірність розподілу повітря через отвори забезпечується поступовим збільшенням їхніх діаметрів від початку труби до її кінця в діапазоні приблизно 18...21 мм. Таким чином, аналітично отримано залежність, що визначає діаметр отвору як функцію його розташування на трубі, що дає змогу обґрунтувати кількість рядів отворів, максимальну довжину труб і крок розташування рядів отворів.

2.5 Висновки

Обґрунтовано геометричні параметри системи аерації. На основі моделювання конічних струменів повітря визначено раціональний крок розташування отворів t та крок між перфорованими трубами a , що забезпечують мінімізацію «мертвих» зон у товщі соломо-гноювої суміші.

Встановлено умови рівномірного розподілу повітря в бурті. Показано, що рівномірність аерації досягається при сталому кроці отворів уздовж труби та їх розміщенні по периметру з кутовим кроком 90° , що дозволяє рівномірно подавати повітря в горизонтальному й вертикальному напрямках.

Розроблено модель розподілу швидкості повітряного потоку в перфорованій трубі. На основі рівнянь газодинаміки та чисельного розв'язання в Mathcad отримано залежність швидкості повітря $v(x)$ уздовж довжини труби з урахуванням стисливості та в'язкого тертя.

Отримано аналітичну залежність діаметра отворів від їх положення вздовж труби. Показано, що для забезпечення однакової витрати повітря через кожен отвір необхідно збільшувати діаметр отворів у напрямку до заглушеного кінця труби (приблизно з 18 до 21 мм при довжині труби 6 м).

Показано вплив внутрішніх властивостей повітря на процес аерації. Використання рівнянь Нав'є–Стокса з урахуванням в'язкості, стисливості та хвильових процесів (аналог гідравлічного удару) дало змогу адекватно описати рух повітряного потоку в системі аерації.

3 Експериментальні дослідження процесу аерації

3.1 Обладнання для проведення досліджень

Більшість відомих технологій утилізації гною та посліду має обмежене застосування в холодний період року, пов'язана з використанням дорогого обладнання або потребує значних капітальних вкладень.

Найбільш простим способом розв'язання цих проблем є компостування, яке дає можливість отримати на виході цінне органічне добриво, придатне для безпосереднього внесення в ґрунт чи використання під час рекультивації земель. Водночас традиційне компостування потребує тривалого періоду витримки гною / посліду (до шести місяців). Перспективним напрямом є використання технологій прискореної аеробної ферментації.

Для реалізації такого підходу запропоновано установку прискореного компостування (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд установки для обробки гною повітрям

Установка являє собою компресор, за допомогою якого повітря подається крізь товщу гною. Продування маси повітрям активізує розвиток аеробної та термофільної мікрофлори, спричиняє інтенсивне нагрівання соломо-гноювої суміші й пришвидшує процес ферментації.

Запропонована технологія може бути використана на птахофабриках, фермах великої рогатої худоби тощо, забезпечуючи безвідходне виробництво. Отриманий компост дозволяє господарствам виробляти екологічно чисту продукцію. В її основу покладено метод аеробного компостування органічної сировини в буртах (рисунок 3.2).

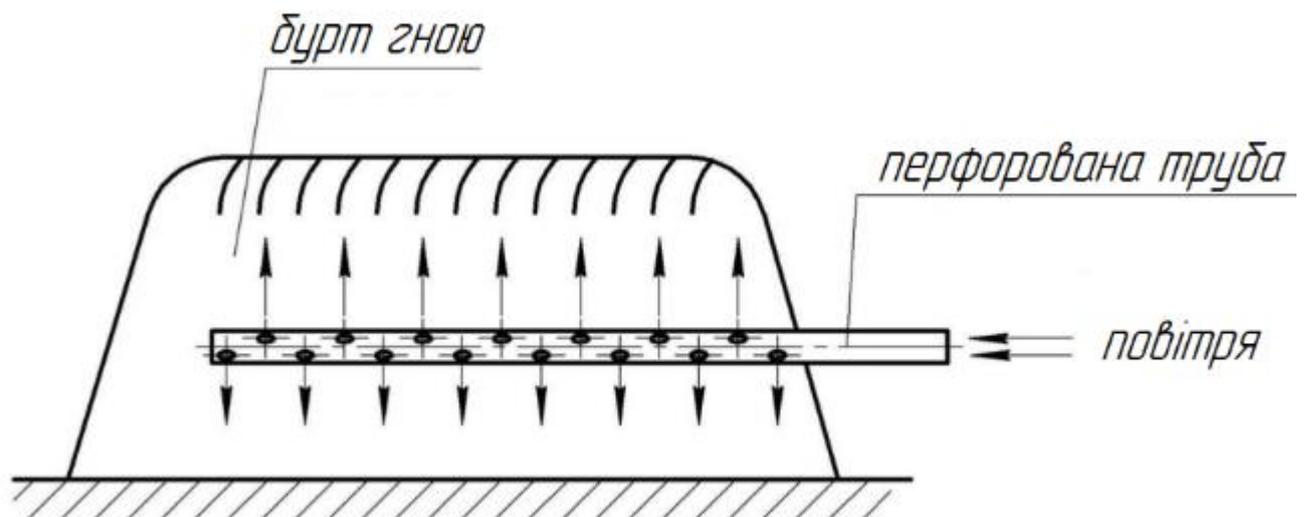


Рисунок 3.2 – Схема аерації гноєвого бурта

Такий спосіб дає змогу знизити енерговитрати, прискорити ферментацію завдяки підвищенню температури матеріалу та більш рівномірному розподілу повітря в усьому об'ємі бурта. При цьому відпадає потреба у постійному ворошінні компостної маси, перевантаженні великих об'ємів гною і використанні дорогої спеціалізованої техніки.

Для підтвердження наукового припущення необхідно дослідити закономірності розподілу повітря по всьому об'єму бурта під час продування компресором. Як джерело повітря було обрано компресор Elitech 220/24/1,5 потужністю 1,5 кВт, з об'ємом ресивера 24 л ($0,024 \text{ м}^3$) і робочим тиском 8 bar (0,8

МПа). За такого тиску в ресивері накопичується близько 180...190 л (0,18...0,19 м³) повітря, приведеного до атмосферного.

Одноразова обробка ящиків з гноєм здійснювалася зазначеним об'ємом повітря, якого достатньо для забезпечення життєдіяльності аеробних мікроорганізмів. Для досліду були підготовлені зразки соломо-гноєвих сумішей: один контрольний ящик і три дослідні ящики розміром 1×1×0,5 м (об'єм 0,5 м³) (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Зразки ящиків розміром 1×1×0,5 м (об'єм 0,5 м³)

Подачу повітря в кожен ящик здійснювали через пластикові труби з внутрішнім діаметром $d = 50$ мм. Бічна поверхня труб перфорована отворами діаметром $d_1 = 18...21$ мм. У першій трубі виконано один ряд отворів, у другій – два, у третій – три ряди (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Перфоровані пластикові труби

Після заповнення ящиків гноєм температурні показники в контрольному та дослідних варіантах реєстрували термометрами ТТР-М з точністю 0,5 °С у визначених контрольних точках (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Термометри ТТР-М з точністю 0,5 °С

3.2 Результати експериментальних досліджень

Було складено матриці планування експерименту, визначені інтервали та рівні варіювання факторів, а також розроблена схема розміщення контрольних точок за рівнями. Результати першого багатофакторного експерименту наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати першого багатофакторного експерименту

№ досліджу	Кількість рядів отворів у трубі А	Кількість обробок на добу В	Кількість обробок на тиждень С	Температура гною Т, °С
1	0	0	0	30,5
2	-1	-1	0	20,5
3	1	-1	0	40,0
4	-1	1	0	25,0
5	1	1	0	38,0
6	-1	0	-1	22,5

7	1	0	-1	27,0
8	0	0	0	31,5
9	-1	0	1	26,5
10	1	0	1	34,5
11	0	-1	-1	18,0
12	0	1	-1	33,5
13	0	-1	1	35,5
14	0	1	1	26,0
15	0	0	0	31,0

У ролі критерію оптимізації обрана температура гною T . Обробку результатів здійснювали за некомпозиційним трирівневим планом Бокса–Бенкіна з використанням програмного пакета «STATGRAPHIC Plus». Унаслідок цього отримано рівняння регресії в закодованому вигляді, яке описує вплив трьох факторів на температуру в товщі гною після обробки повітрям (3.1):

$$T = 31,0 + 5,63A - 1,06B + 2,69C - 0,38A^2 - 1,62AB + 0,88AC + 0,25B^2 - 6,25BC - 3,0C^2 \quad (3.1)$$

Значущість коефіцієнтів регресії перевіряли за критерієм Стюдента. Значущими виявилися фактор A (кількість рядів отворів у трубі), добуток факторів B і C (взаємодія «кількість обробок на добу – кількість обробок на тиждень»), фактор C та квадрат фактора C .

Використавши діаграму Парето, незначущі коефіцієнти відкинули й спростили рівняння регресії, залишивши тільки вплив факторів A , C , їх взаємодії BC і квадратичного члена C^2 . Уточнене рівняння математичної моделі має вигляд (3.2):

$$T = 31,0 + 5,63A + 2,69C - 6,25BC - 3,0C^2 \quad (3.1)$$

За допомогою програмного пакета «STATGRAPHIC Plus» побудовано поверхні відгуку $T = f(A,B)$, $T = f(B,C)$, $T = f(A,C)$ (рисунок 3.6).

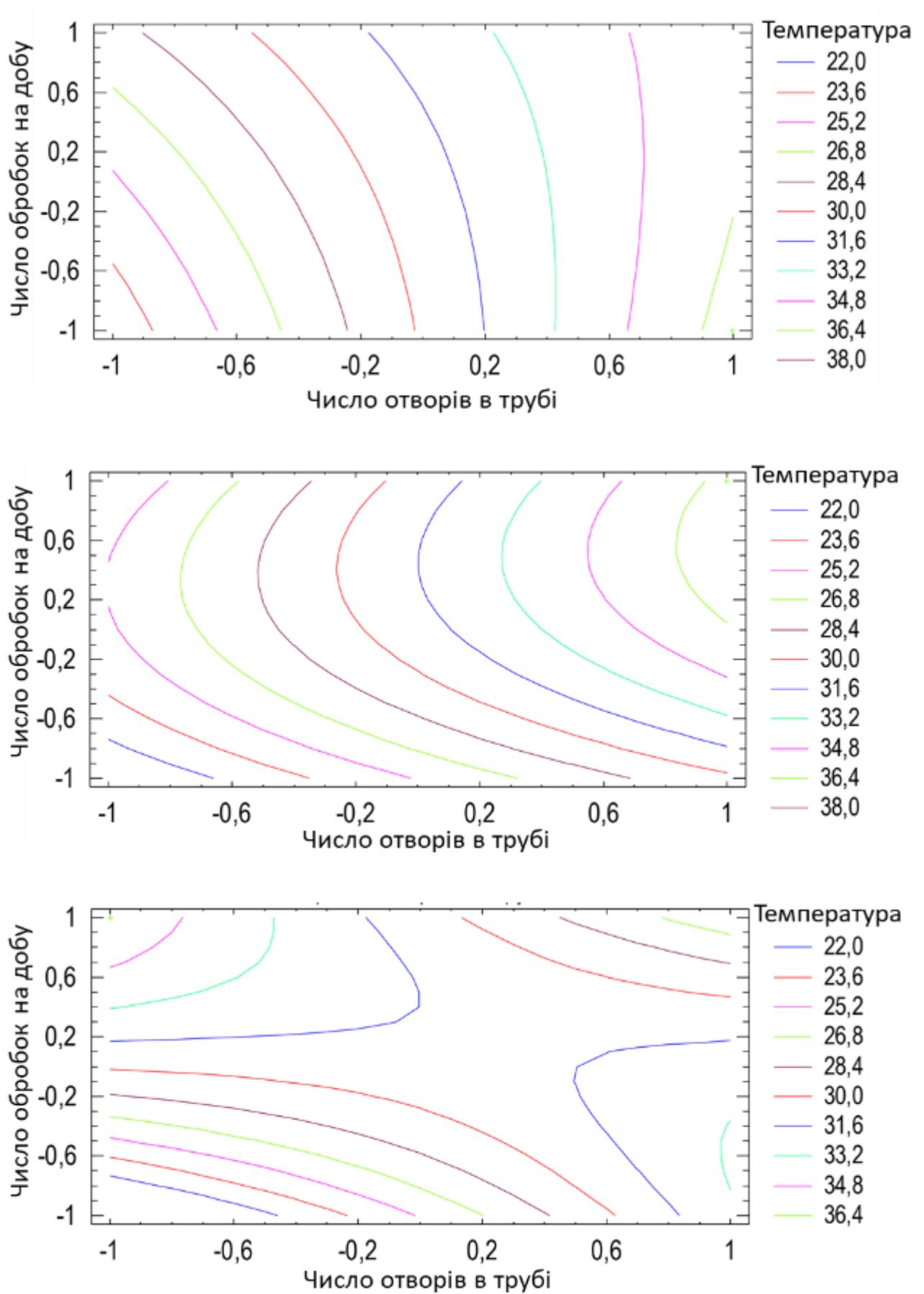


Рисунок 3.6 – Поверхні відгуку $T = f(A, B)$, $T = f(B, C)$, $T = f(A, C)$

На основі аналізу отриманого рівняння регресії (математичної моделі) було визначено такі значення варійованих факторів, які забезпечують максимальне нагрівання соломо-гноювої суміші під час обробки її повітрям. Оптимальні закодовані значення факторів становлять: $A = 0,997152 \approx 1,0$; $B = -1,0$; $C = 1,0$.

Тобто для більш інтенсивного прогрівання товщі соломо-гноювої суміші необхідно збільшити кількість рядів отворів у повітроподавальній трубі (це підвищує рівномірність розподілу повітря по об'єму бурта); забезпечити одноразову обробку суміші повітрям протягом доби, оскільки багаторазові продувки призводять до надходження холодного зовнішнього повітря і зниження температури всередині бурта; кількість обробок на тиждень має бути не меншою ніж три, щоб компенсувати споживання кисню мікроорганізмами та підтримувати їхню активність.

Таблиця 3.2 – Температурне поле в першому контрольному ящику з гноєм, °С

Точка / рівень	1	2	3	4	5
a	45,5	47,0	48,0	47,0	50,5
b	44,0	45,0	46,0	43,5	51,0
c	45,0	45,0	48,0	44,0	53,0

Таблиця 3.3 – Температурне поле в експериментальному ящику з гноєм до одноразової обробки повітрям, °С

Точка / рівень	1	2	3	4	5
a	48,5	50,0	48,5	50,5	51,0
b	47,0	48,5	49,5	51,0	53,0
c	48,0	48,0	49,0	49,5	51,5

Таблиця 3.4 – Температурне поле в експериментальному ящику з гноєм після одноразової обробки повітрям, °С

Точка / рівень	1	2	3	4	5
а (відразу)	48,0	48,5	48,0	48,5	52,0
а (через 15 хв)	50,0	50,0	50,0	50,0	52,5
б (відразу)	47,0	47,5	47,5	49,0	52,5
б (через 15 хв)	49,0	49,5	50,5	50,5	58,5
с (відразу)	47,0	47,0	48,5	47,5	51,5
с (через 15 хв)	50,0	50,5	51,0	51,0	56,0

Аналіз отриманих даних показує, що температурне поле має виражений градієнт по об'єму соломо-гноєвого бурта. В усіх випадках центральна частина бурта характеризується вищою температурою (у середньому на 4...11 °С), ніж шари гною, що розташовані біля стінок ящика.

Крім того, верхній шар навозу, який безпосередньо контактує з навколишнім середовищем, має нижчу температуру порівняно з нижчими шарами. Це зумовлено тепло- та вологовіддачею поверхневого шару в навколишнє середовище, що призводить до його охолодження.

Середня температура контрольного ящика із соломо-гноєвою сумішшю (математичне сподівання) становила 46,8 °С за довірчого інтервалу $\pm 2,8$ °С (за рівня значущості $\alpha = 0,05$).

Середня температура соломо-гноєвої суміші в дослідному ящику після одноразової щоденної обробки протягом доби та дворазової обробки протягом тижня (математичне сподівання) становила 51,3 °С за довірчого інтервалу $\pm 2,6$ °С (за рівня значущості $\alpha = 0,05$).

3.3 Висновки

Підтверджено ефективність примусової аерації. Обдування соломо-гноєвої суміші повітрям від компресора забезпечує підвищення температури в

товщі бурта порівняно з варіантом без обробки, що свідчить про інтенсифікацію аеробної ферментації.

Встановлено нерівномірність температурного поля. Температура в центральній зоні бурта на 4...11 °C вища, ніж біля країв, а поверхневий шар має нижчу температуру через тепло- й вологообмін з навколишнім середовищем.

Підтверджено приріст температури в дослідному варіанті. Середня температура в контрольному ящику становила 46,8 °C ($\pm 2,8$ °C), тоді як у дослідному — 51,3 °C ($\pm 2,6$ °C), що демонструє помітне посилення процесів біоферментації при аерації.

Обґрунтовано раціональні режими обробки. Оптимальними є: збільшена кількість рядів отворів у трубі (три ряди), одноразова обробка повітрям протягом доби та не менше трьох обробок на тиждень, що забезпечує достатнє надходження кисню без надмірного охолодження маси.

Підтверджено конструктивні рішення системи аерації. Використання перфорованих труб із різною кількістю рядів отворів дає змогу керувати рівномірністю розподілу повітря в об'ємі та формувати бажане температурне поле в бурті.

Експериментально підтверджено адекватність теоретичної моделі. Отримані дані добре узгоджуються з теоретичними розрахунками, що дозволяє використовувати побудовану математичну модель для подальшої оптимізації параметрів установки в виробничих умовах.

4 Охорона праці

4.1 Загальні вимоги охорони праці при обробці гною

Обробка гною та соломо-гноювих сумішей належить до робіт підвищеної небезпеки, оскільки пов'язана з виділенням шкідливих газів (аміак, сірководень, метан, вуглекислий газ), наявністю біологічних факторів (патогенна мікрофлора, спори грибків, яйця та личинки гельмінтів), значним фізичним навантаженням на працівників, а також ризиком травмування при роботі з механізмами та обладнанням. Небезпечними та шкідливими виробничими факторами вважаються хімічні чинники (агресивні гази, органічний пил), біологічні (мікроорганізми, віруси, паразити), фізичні (несприятливий мікроклімат, підвищена вологість, забруднення повітря, шум), механічні (рухомі частини машин, ризик падінь на слизьких поверхнях) та електричні (можливість ураження струмом при пошкодженні електрообладнання).

Загальні вимоги охорони праці під час організації робіт з гноєм передбачають забезпечення ефективної природної або штучної вентиляції робочих зон, контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі, недопущення перевищення гранично допустимих концентрацій, створення належних санітарно-побутових умов (наявність рукомийників, душу, приміщень для зберігання спецодягу й засобів гігієни). Працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту: спецодягом (комбінезон, чоботи, фартух), захисними рукавицями, респіраторами або напівмасками для захисту від пилу та газів, а за потреби – захисними окулярами. Важливим є систематичне проведення вступного, первинного, повторного та позапланового інструктажів, навчання безпечним методам роботи, а також організація періодичних медичних оглядів працівників, які постійно контактують з гноєм. Окрему увагу приділяють профілактиці пожеж та вибухів, оскільки під час ферментації гною можливе виділення метану; у зв'язку з цим забороняється застосування відкритого вогню,

паління та виконання вогневих робіт поблизу буртів без спеціальних заходів безпеки.

4.2 Оцінка з точки зору охорони праці розробленого аератора

Розроблений аератор гнойових буртів являє собою систему перфорованих труб, з'єднаних через колектор з ресивером і компресором, що забезпечує порційну подачу стисненого повітря в товщу соломо-гнойової суміші. Такий підхід дозволяє значною мірою відмовитися від традиційного інтенсивного ворошіння буртів великогабаритними машинами, зменшити кількість ручних операцій та, відповідно, знизити ризик травмування працівників. Відсутність необхідності постійного переміщення важкої техніки по буртові зменшує ймовірність наїздів, перекидання машин та механічних ушкоджень. Укриття бурта плівкою разом із примусовою аерацією сприяє зниженню викидів запахів, аерозолів та шкідливих газів у робочу зону, що покращує санітарно-гігієнічні умови праці.

Водночас експлуатація аератора пов'язана з рядом специфічних небезпек. Робота зі стисненим повітрям вимагає контролю технічного стану ресивера, манометрів, запобіжних клапанів, шлангів і з'єднань, оскільки їх пошкодження може призвести до різкого розриву рукавів, ударної хвилі, механічних травм та ушкодження органів слуху й зору. Електродвигун компресора повинен мати справне заземлення, захисні автомати та експлуатуватися в сухих умовах з урахуванням підвищеної вологості й можливого забруднення. Рівень шуму від компресора при тривалому використанні може вимагати застосування протишумових навушників. Також існує ймовірність локального піднімання пилу й аерозолів у місцях виходу повітря, що зумовлює необхідність використання респіраторів.

За умови виконання вимог інструкції з охорони праці, регулярного технічного обслуговування та застосування належних засобів індивідуального захисту розроблений аератор можна вважати технологічно і ергономічно більш безпечним рішенням порівняно з традиційними системами, які базуються на багаторазовому механічному ворошінні гнойових буртів.

4.3 Проєкт інструкції з охорони праці при роботі аератором

1. Загальні положення

1.1. Інструкція встановлює вимоги охорони праці під час експлуатації аератора гнойових буртів (установка примусової аерації соломо-гнойових сумішей).

1.2. До роботи з аератором допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд, вступний інструктаж з охорони праці, первинний інструктаж на робочому місці та навчання безпечним методам роботи.

1.3. Працівник повинен знати будову аератора, принцип його роботи, розташування органів керування, запобіжної арматури та засобів аварійного відключення.

1.4. Працівник зобов'язаний дотримуватися вимог цієї інструкції, правил внутрішнього трудового розпорядку, пожежної безпеки та санітарних норм.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Одягти справний спецодяг і ЗІЗ: комбінезон або халат, гумові чоботи, захисні рукавиці, при необхідності – респіратор (напівмаска від газів/пилу) та захисні окуляри.

2.2. перевірити чистоту проходів і площадок біля бурта, за потреби прибрати слизькі ділянки, не допускати калюж рідкої гноївки.

2.3. Переконавшись у справності електроживлення компресора:

- цілісність кабелю, вилки, розеток;
- наявність заземлення;
- відсутність оголених провідників, слідів підгару.

2.4. Оглянути компресор, ресивер, манометр, запобіжний клапан, вентилі й з'єднувальні шланги. При виявленні тріщин, здуття, витоків повітря роботу не розпочинати.

2.5. Переконавшись в правильності під'єднання гнучкого шланга до колектора перфорованих труб, відсутності механічних пошкоджень труб у бурті.

2.6. Перевірити наявність аптечки першої допомоги та засобів пожежогасіння (вогнегасник).

3. Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Запускати компресор згідно з інструкцією заводу-виробника, не перевищувати встановлений робочий тиск у ресивері.

3.2. Під час нагнітання повітря в ресивер контролювати показники манометра, не допускати роботи запобіжного клапана в аварійному режимі.

3.3. Відкривати вентиль подачі повітря до картера перфорованих труб плавно, без різких рухів, перебуваючи збоку від шлангів і з'єднань.

3.4. Не допускати знаходження сторонніх осіб у безпосередній близькості до шлангів під тиском і місць виходу повітря.

3.5. Забороняється:

- ремонтувати або підтягувати з'єднання шлангів і труб під час подачі повітря;

- перекручувати, перегинати або навмисно пережимати шланги;

- працювати з несправними приладами контролю (манометр, запобіжний клапан).

3.6. У разі появи сторонніх шумів, вібрацій, запаху перегріву електродвигуна негайно зупинити компресор, від'єднати його від мережі та повідомити відповідальну особу.

3.7. При відчутті різкого запаху сірководню або аміаку, появі запаморочення, нудоти чи інших ознак отруєння негайно припинити роботу, вийти на свіже повітря, повідомити керівника та звернутися до медпункту.

3.8. Стежити за станом укривної плівки бурта: не допускати її пошкодження у місцях виходу повітря та з боків бурта.

4. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

4.1. При розриві шланга, різкому витoku повітря або пошкодженні труб негайно перекрити вентиль подачі повітря та вимкнути компресор.

4.2. При виникненні пожежі:

- знеструмити обладнання;

- скористатися вогнегасником відповідного типу;

- при неможливості ліквідації пожежі власними силами – викликати пожежну службу та організувати евакуацію людей.

4.3. У разі нещасного випадку надати потерпілому першу допомогу, викликати медичну службу та повідомити керівництво.

5. Вимоги безпеки після закінчення роботи

5.1. Відключити компресор від електромережі, стравити залишковий тиск із системи через вентиль.

5.2. Оглянути шланги, труби, укривний матеріал, зафіксувати виявлені несправності в журналі або повідомити відповідальному за обладнання.

5.3. Очистити робоче місце від забруднень, привести в порядок проходи.

5.4. Зняти спецодяг, очистити від забруднень, при необхідності здати у прання, вимити руки з милом, за можливості прийняти душ.

4.4 Висновки

У розділі «Охорона праці» розглянуто основні небезпечні та шкідливі фактори, що виникають при обробці гною та компостуванні соломо-гноювих сумішей, а також визначено комплекс організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів щодо їх попередження.

Проаналізовано безпеку розробленого аератора гноювих буртів і показано, що за умови дотримання вимог електробезпеки, правил роботи зі стисненим повітрям та використання ЗІЗ, установка є технологічно й ергономічно більш безпечною порівняно з традиційними методами ворошіння буртів.

Запропонований проєкт інструкції з охорони праці при роботі аератором може бути використаний як основа для розробки локальної інструкції на підприємстві, що забезпечить нормативний рівень безпеки праці персоналу, зайнятого на роботах із прискореним компостуванням гною.

5 Економічне обґрунтування застосування аератора

У даному розділі визначається передбачувана економічна ефективність застосування розробленого аератора для прискореного компостування гною. Розрахунки виконано для однозмінної роботи, при цьому кількість обробок бурта прийнята рівною шести. Оскільки при використанні традиційної технології спеціальна обробка гною не проводиться, техніко-економічні показники розраховуються лише для операцій, пов'язаних із застосуванням розробленої машини. Окрім експлуатаційних витрат, враховано очікуваний економічний ефект від підвищення якості добрив, а саме збільшення вмісту активних поживних речовин, що досягається при застосуванні запропонованої технології аеробного компостування.

Визначення вартості продукту здійснюємо за формулою:

$$V = C_a \cdot (P_{a.o} / P_{a.m}) + C_f \cdot (P_{f.o} / P_{f.m}) + C_k \cdot (P_{k.o} / P_{k.m}) \quad (5.1)$$

де C_a , C_f , C_k – вартість добрив, відповідно азотних, фосфорних та калійних, грн/т; $P_{a.o}$, $P_{f.o}$, $P_{k.o}$ та $P_{a.m}$, $P_{f.m}$, $P_{k.m}$ – вміст азоту, фосфору та калію відповідно в органічних (табл. 5.1) та мінеральних добривах, %.

Традиційна технологія (розрахункова вартість 1 т органічних добрив):

$$V_t = 2\,568,52 \text{ грн/т.}$$

Проектна технологія (застосування аерації соломо-гною суміші):

$$V_p = 3\,622,28 \text{ грн/т.}$$

Таким чином, приріст вартості добрив для проектного варіанту становить:

$$\Delta V = V_p - V_t = 3\,622,28 - 2\,568,52 = 1\,053,76 \text{ грн/т.}$$

Вихідні дані до розрахунків та їх результати приведено в додатках.

Техніко-економічний аналіз із урахуванням вартості обладнання 160200 грн та річного навантаження 1000 т показав, що застосування розробленого гноєрозкидача для прискореного компостування гною залишається економічно доцільним. Розрахункова вартість 1 т отриманих органічних добрив за рахунок підвищеного вмісту азоту, фосфору та калію становить близько 3,62 тис. грн/т проти 2,57 тис. грн/т для традиційної технології, тобто приріст вартості складає близько 1,05 тис. грн/т.

Питомі експлуатаційні витрати при нових умовах експлуатації становлять близько 147.22 грн/т. Очікуваний економічний ефект від впровадження установки при річному навантаженні 1000 т становить приблизно 906544 грн/рік, а строк окупності капітальних вкладень не перевищує 0,18 року. Це свідчить про високу ефективність та доцільність впровадження розробленої установки навіть за умов відносно невеликого річного навантаження.

Загальні висновки

1. У першому розділі на основі аналізу вітчизняних і зарубіжних джерел встановлено, що традиційні технології утилізації гною та посліду (буртування, пасивне компостування, тривале зберігання у гноєсховищах) є надто тривалими, супроводжуються значними втратами азоту, виділенням шкідливих газів та не гарантують стабільної санітарної якості компосту. Показано актуальність технологій аеробного компостування з примусовою аерацією соломо-гноєвих сумішей, які дозволяють скоротити тривалість ферментації, підвищити температуру в товщі бурта, поліпшити агрохімічні показники та санітарний стан органічних добрив.

2. У другому розділі теоретично обґрунтовано процес руху та розподілу повітряного потоку в соломо-гноєвій масі при подачі через перфоровані горизонтальні труби. Побудовано математичні моделі розподілу повітря в поперечному та поздовжньому перерізах бурта, визначено залежності між кроком розміщення отворів, висотою перетину конічних струменів і кроком укладання труб. Отримано аналітичні вирази для зміни швидкості повітря вздовж труби та діаметра отворів залежно від координати, що дозволило задати раціональні конструктивні параметри аераційної системи й забезпечити максимально рівномірну аерацію об'єму бурта.

3. У третьому розділі розроблено конструкцію установки для примусової аерації гноєвих буртів, яка містить компресор із ресивером, колектор та систему перфорованих пластикових труб. Запропоновано технологічну схему прискореного компостування з порційною подачею повітря, придатну для впровадження на існуючих гноєнакопичувальних майданчиках без кардинальної реконструкції. Обґрунтовано вибір основних елементів та режимів роботи установки, показано конструктивні переваги порційної подачі повітря (відсутність потреби у ворошінні бурта, можливість роботи під плівковим укриттям, зменшення енерговитрат у порівнянні з безперервною аерацією).

4. Проведено експериментальні дослідження на модельних буртах (ящиках) для оцінки впливу кількості рядів отворів, частоти обробок повітрям на

температурний режим і мікробіологічні показники соломо-гноювої суміші. За результатами багатофакторного планування (типу Бокса–Бенкена) встановлено, що оптимальними є труби з трьома рядами отворів, однократна обробка суміші повітрям протягом доби та не менше трьох обробок на тиждень. Показано, що за таких режимів температура в товщі навозу стабільно досягає термофільного рівня (понад 50 °C), формується більш рівномірне температурне поле, що забезпечує інтенсифікацію ферментації, зниження загальної мікробної забрудненості, інактивацію патогенних мікроорганізмів, яєць і личинок гельмінтів, поліпшення санітарної якості компосту.

5. У п'ятому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування застосування розробленої установки примусової аерації гноювих буртів з урахуванням сучасних цін на мінеральні добрива та електроенергію і різних варіантів річного навантаження. Встановлено, що за рахунок підвищення вмісту азоту, фосфору та калію приріст вартості 1 т органічних добрив становить орієнтовно 1,0–1,1 тис. грн/т, тоді як питомі експлуатаційні витрати істотно менші за отриманий додатковий ефект. Розрахований строк окупності капітальних вкладень не перевищує 1 року навіть за відносно невеликого річного обсягу компостування, що свідчить про високу економічну доцільність і перспективність впровадження розробленої технології на тваринницьких підприємствах різного масштабу.

Бібліографія

1. Castro-Herrera, D., Fernández-Bayo, J. D., & Pérez-Murcia, M. D. (2022). Nutrient dynamics during composting of human excreta, cattle manure and other organic residues. *Journal of Environmental Quality*, 51(6).
2. Font-Palma, C. (2019). Methods for the treatment of cattle manure—A review. *ChemEngineering*, 5(2), 27.
3. Katada, S., Fukuda, A., Nakajima, C., Suzuki, Y., Azuma, T., Takei, A., ... Usui, M. (2021). Aerobic composting and anaerobic digestion decrease the copy numbers of antibiotic-resistant genes in dairy farms in Hokkaido, Japan. *Frontiers in Microbiology*, 12, 737420.
4. Koura, H. A., El-Magued, A. A., & Aboelhassan, A. M. (2020). Effect of two aeration systems on the physicochemical parameters during composting of poultry and cattle manure. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 10(3), 38–49.
5. Rynk, R. (Ed.). (1992). *On-farm composting handbook (NRAES-54)*. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service.
6. Saludes, R. B., Imai, T., Dia, M., Higuchi, T., & Yamamoto, K. (2007). Composting of dairy cattle manure using a thermophilic–mesophilic sequence. *Bioresource Technology*, 98(2), 281–287.
7. Urban Worm Company. (2019, August 29). Aerated static pile composting: An introduction to ASP. UrbanWormCompany.com.
8. UMass Extension. (2017, February 15). Low-cost aerated static composting systems for small acreage equine operations. University of Massachusetts Amherst.
9. Wang, L., Li, X., Zhang, Y., & Liu, X. (2024). Microbe-aided thermophilic composting accelerates manure composting and improves compost quality. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1472922.
10. Zalewska, M., Osińska, A., & Stefaniuk, M. (2024). Effect of composting and storage on the microbiome and resistome of cattle manure. *Environmental Science and Pollution Research*.

11. Zhang, Q., Li, M., Li, G., & Li, H. (2019). Characteristics and optimization of dairy manure composting for reuse as a dairy mattress in areas with large temperature differences. *Journal of Cleaner Production*, 235, 293–303.
12. Zhao, E., Zhang, H., & Liu, Y. (2025). A review on the degradation of antibiotic resistance genes during aerobic composting of livestock manure. *Toxics*, 13(8), 667.
13. Periskop System. (2025). The ultimate guide to aerated static pile composting. PeriskopSystem.com.
14. БТУ-ЦЕНТР. (2025). Ефективні біотехнологічні рішення для компостування гною. ТОВ «НВК «БТУ-ЦЕНТР».
15. БТУ-ЦЕНТР. (2025). Біопрепарати, деструктори та компост: досвід агрохолдингів. ТОВ «НВК «БТУ-ЦЕНТР».
16. Integro-SD. (2021, April 8). Turning chicken manure into fertiliser and a source of energy. EU4Business.
17. Ковтун, А. Л., Дорошенко, О. А., та ін. (2023). Ефективність застосування ферментованого посліду бройлерів як органічного добрива. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*.
18. Мітюхло, О. В. (2025). Біодеградація соломи гороху при компостуванні з використанням біодеструктора. *Збірник наукових праць НУБіП України*.
19. Осіпенко, І. С., & Мерзлов, С. Г. (2023). Температурний, мікробіологічний та хімічний склад різних варіантів компостування посліду птиці. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*.
20. Родіонова, І., Бурка, О., & Шевченко, Л. (2021). Основні вимоги до утримання побічних продуктів тваринного походження на фермах України. *Економіка АПК*.
21. SAF Україна. (2022). Органічні добрива: стан та перспективи в Україні. *Аналітичний звіт*.
22. UABio – Біоенергетична асоціація України. (2021). Органічні добрива з біомаси: потенціал і бар'єри розвитку в Україні. *Аналітична доповідь*.

23. Жук, В. (2022). Agricultural waste in Ukraine: Generation volumes and recycling issues. AgroPolis Analytical Report.

24. Netherlands Enterprise Agency (RVO). (2018). Waste Management in Ukraine: Opportunities for Dutch companies.

25. MacHOUSE / Integro. (2022). Gumino®: Organic fertilizer from chicken manure – Ukrainian technology and market. MacHOUSE Group.

ДОДАТКИ

Вихідні дані до розрахунку техніко-економічних показників

Показник	Традиційна технологія	Проектowana
Вміст поживних речовин у кінцевому продукті, %: азот	1,8	2,5
фосфор	2,3	3,6
калій	2,1	2,6
Вартість обладнання для обробки, грн	-	160 200
Сумарна потужність комплекту, кВт	-	7,6
Продуктивність, т/год	-	20,0
Обслуговуючий персонал, люд.	-	3
Кількість обробок на рік	-	6
Тривалість робіт на рік, днів	-	30
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань	-	0,18
Коефіцієнт відрахувань на ТО і ремонт	-	0,15
Максимальне річне навантаження, т	-	1 000

Показники економічної ефективності машини для компостування (з урахуванням актуальних цін та річного навантаження 1 000 т)

Показник	Значення
Продуктивність, т/год	20,0
Сумарна встановлена потужність, кВт	7,6
Обслуговуючий персонал, люд.	3
Балансова (капітальна) вартість, грн	160 200
Розрахункова вартість отриманих органічних добрив, грн/т	3 622,28
Питомі експлуатаційні витрати, грн/т	147.22
у т.ч.: заробітна плата, грн/т	4.09
витрати на енергоресурси (електроенергія), грн/т	90.26
амортизаційні відрахування, грн/т	28.84
витрати на ТО та ремонт, грн/т	24.03
Приріст вартості отриманих добрив, грн/т	1053.76
Економічний ефект від приросту вартості, грн/т	906.54
Максимальне річне навантаження, т	1 000
Економія витрат при максимальному річному виробітку, грн/рік	906 544
Строк окупності капітальних вкладень, років	0.18

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів аератора гною

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-3-24
Огіль Віталій Сергійович

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

Дніпро 2025

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета роботи – підвищити ефективність аеробної обробки соломо-гноювих сумішей у буртах шляхом застосування штучної аерації з порційною подачею повітря та обґрунтувати конструктивно-режимні параметри установки аерації.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. На основі аналізу існуючих технологій та технічних засобів утилізації гною розробити принципову схему установки штучної аерації соломо-гноювих буртів з порційною подачею повітря.
2. Теоретично обґрунтувати параметри та режими роботи аератора, зокрема закони розподілу повітряного потоку в об'ємі бурта, оптимальний крок розташування перфорованих труб і діаметри отворів уздовж труби.
3. На основі лабораторних експериментів на дослідній установці обґрунтувати раціональні режими роботи аератора (кількість рядів отворів, кратність обробок за добу і за тиждень) із застосуванням методів математичного планування експерименту та статистичної обробки результатів.
4. Оцінити економічну ефективність впровадження розробленої установки в умовах тваринницького підприємства з урахуванням приросту вартості компосту як органічного добрива, експлуатаційних витрат та строку окупності капітальних вкладень.

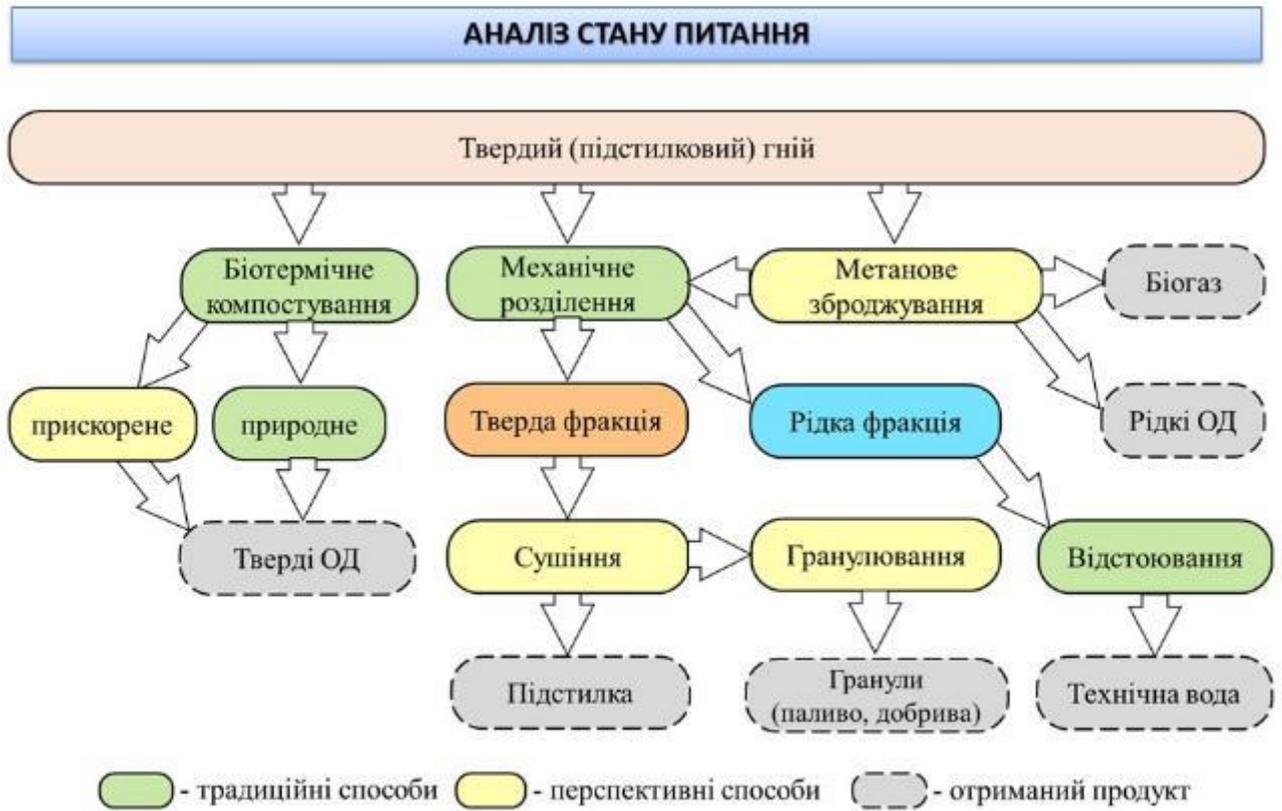


Рисунок 1 - Технології переробки твердого гною

3



4

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

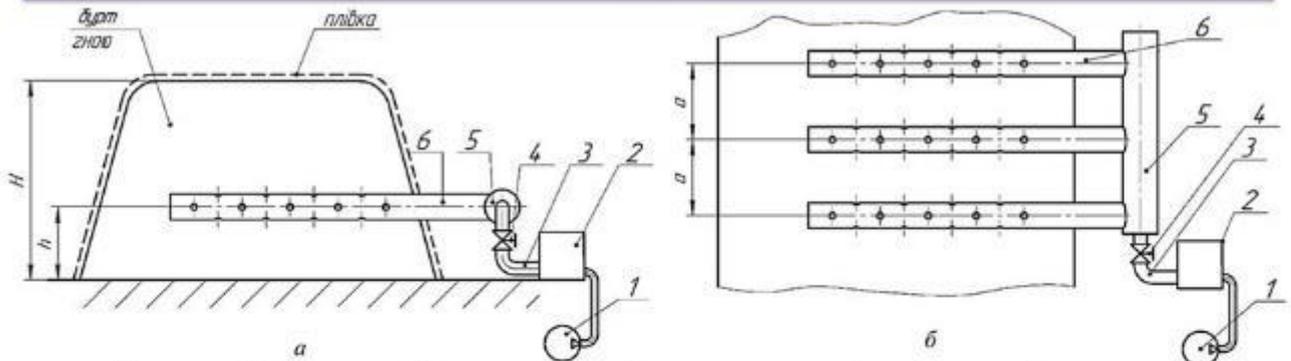


Рисунок 2 - Схема роботи аератора: 1 – компресор; 2 – ресивер; 3 – гнучкий повітряний шланг; 4 – вентиль; 5 – колектор; 6 – перфоровані трубопроводи

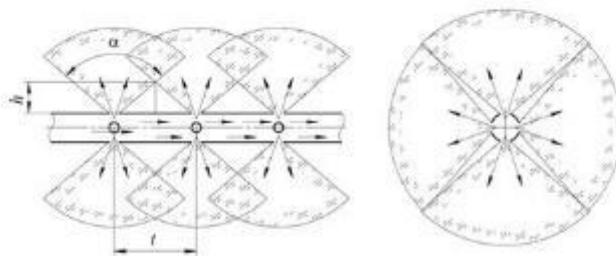


Рисунок 3 – Схема розподілу повітря в повітродувній трубі

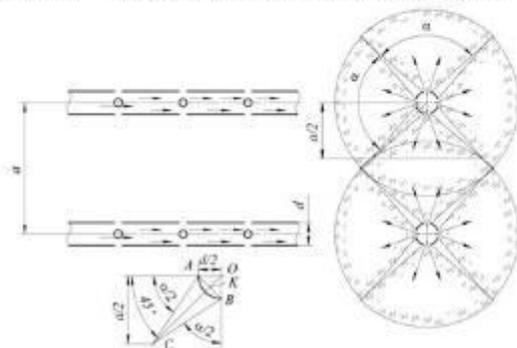


Рисунок 4 – Схема розташування труб у горизонтальній площині **5**

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ



Рисунок 5 – Розміщення повітродувної труби в бурті та крок розташування отворів

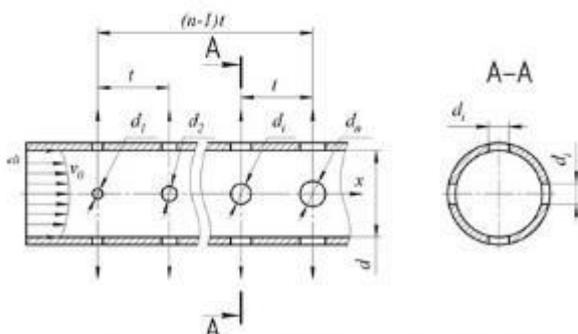


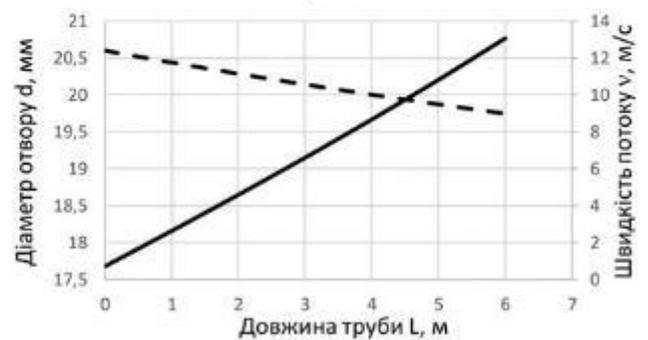
Рисунок 6 – Розрахункова схема труби для моделі витікання повітря з отворів

Рівняння для розподілу швидкості повітряного потоку вздовж труби (м/с)

$$v(x) = \frac{v_0}{\sqrt{1 + \frac{2,26x}{21 - x}}}$$

Рівняння для визначення діаметра отворів від довжини труби (мм)

$$d(x) = \frac{d}{\sqrt{u(x)n}}$$



— Діаметр отвору d, мм - - - Швидкість потоку v, м/с

Рисунок 7 – Графіки теоретичних залежностей швидкості повітряного потоку та діаметра отворів від довжини труби **6**

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



Рисунок 8 – Зовнішній вигляд лабораторної установки

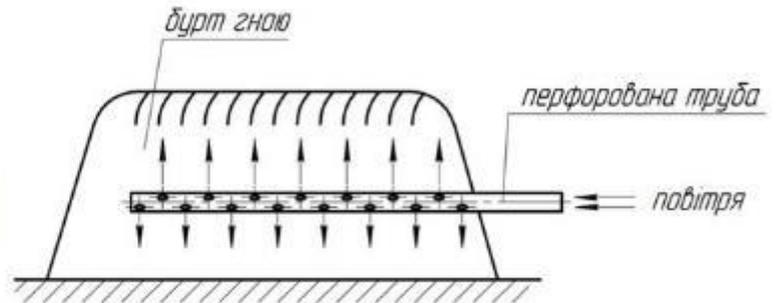


Рисунок 9 – Схема аерації гноєвого бурта



Рисунок 10 – Зразки ящиків розміром 1x1x0,5 м (об'єм 0,5 м³)



Рисунок 11 – Перфоровані пластикові труби

7

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтервали та рівні варіювання факторів

Фактори	Рівні			Інтервали варіювання
	нижній (-1)	нульовий (0)	верхній (+1)	
А – Число отворів в трубі, шт.	5	10	15	5
В – кількість обробок за добу, раз	1	2	3	1
С – кількість обробок за тиждень, раз	1	2	3	1

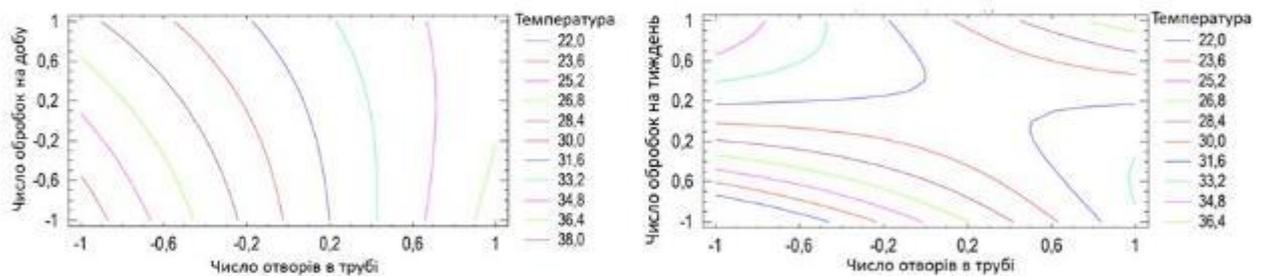
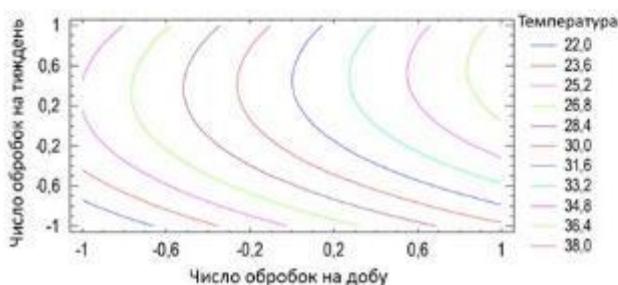


Рисунок 12 – Поверхні відгуків $T = f(A,B)$, $T = f(B,C)$, $T = f(A,C)$



Рівняння регресії в закодованому вигляді, яке описує вплив трьох факторів на температуру в товщі гною після обробки повітрям

$$T = 31,0 + 5,63A + 2,69C - 6,25BC - 3,0C^2$$

8

ОХОРОНА ПРАЦІ

Карта контролю показників безпеки аератора гною

№	Етап / місце контролю	Показник, що перевіряється	Нормативна вимога / допустимий стан	Періодичність контролю	Відповідальний (П.І.Б., підпис)
1	Компресор, ресивер	Цілісність корпусу, відсутність тріщин, вм'ятин, слідів корозії	Візуальних дефектів немає, кріплення не послаблені	Перед кожним ввімкненням	Оператор
2	Компресор, ресивер	Робота запобіжного клапана, справність манометра	Клапан спрацює, манометр показує тиск без ривків, клас точності не нижче 1,5	Щоденно перед початком зміни, 1 раз/квартал – перевірка служби ОП	Оператор / інженер ОП
3	Електроживлення	Цілісність кабелю, вилки, наявність заземлення	Пошкодження ізоляції немає, заземлення під'єднане, опір у нормі	Перед кожним ввімкненням, вимір опору – 1 раз/рік	Електрик / оператор
4	Гнучкий повітряний шланг	Тріщини, здуття, місця протирання, надійність хомутів	Відсутні видимі пошкодження, хомути затягнуті	Перед кожною обробкою бурта	Оператор
5	Колектор і перфоровані трубопроводи	Герметичність з'єднань, відсутність перекосів, засмічення отворів	Не спостерігається витоків повітря, отвори чисті	Перед початком циклу аерації, потім не рідше 1 раз/тиждень	Оператор
6	Робоча зона біля бурта	Наявність сторонніх предметів, слизьких ділянок, ям, перешкод	Робоча зона очищена, прохід не менше 1 м, підлога/грунт не слизькі	Щоденно перед роботою	Оператор
7	Засоби індивідуального захисту	Наявність та стан спецодягу, рукавиць, чобіт, респіраторів, окулярів	ЗІЗ справні, відповідають умовам роботи, видані під розпис	Перед кожним виходом на роботу	Оператор / відповідальний за ЗІЗ
8	Рівень шуму від компресора	Відповідність нормативам (≤ 80 дБА на робочому місці)	За результатами вимірів – в нормі; при перевищенні застосовувати протишумні навушники	1 раз/рік або після ремонту/заміни обладнання	Інженер ОП / лабораторія
9	Мікроклімат та газу біля бурта	Наявність різкого запаху аміаку, сірководню, задухи	При появі різкого запаху роботу припинити, провітрити, за потреби – виміряти концентрацію	Під час кожної зміни візуально, при скаргах – інструментально	Оператор / інженер ОП
10	Пуск/зупинка компресора	Послідовність дій оператора, застосування ЗІЗ	Ввімкнення/вимкнення відповідно до інструкції, без різких ударів по обладнанню	Періодичний нагляд, не рідше 1 раз/місяць – цільовий інструктаж	Майстер / інженер ОП
11	Планово-попереджувальний ремонт	Виконання ППР компресора, ресивера, арматури	ППР проведений згідно графіка, записи в журналі технічного обслуговування	Згідно графіка ППР (1–2 рази/рік)	Служба ремонту
12	Журнал інструктажів з ОП	Наявність записів про первинний, повторний, цільовий інструктаж	Усі працівники інструктовані, підписи наявні	Первинний – при прийомі; повторний – 1 раз/6 міс; цільовий – за потреби	Інженер ОП

9

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО АЕРАТОРА

Вихідні дані

Показник	Традиційна технологія	Проектована
Вміст поживних речовин у кінцевому продукті, %: азот	1,8	2,5
фосфор	2,3	3,6
калій	2,1	2,6
Вартість обладнання для обробки, грн	-	160 200
Сумарна потужність комплекту, кВт	-	7,6
Продуктивність, т/год	-	20,0
Обслуговуючий персонал, люд.	-	3
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань	-	0,18
Коефіцієнт відрахувань на ТО і ремонт	-	0,15
Максимальне річне навантаження, т	-	1 000

Показники економічної ефективності аератора

Показник	Значення
Продуктивність, т/год	20,0
Сумарна встановлена потужність, кВт	7,6
Обслуговуючий персонал, люд.	3
Балансова (капітальна) вартість, грн	160 200
Розрахункова вартість отриманих органічних добрив, грн/т	3 622,28
Питомі експлуатаційні витрати, грн/т	147,22
у т.ч.: заробітна плата, грн/т	4,09
витрати на енергоресурси (електроенергія), грн/т	90,26
амортизаційні відрахування, грн/т	28,84
витрати на ТО та ремонт, грн/т	24,03
Приріст вартості отриманих добрив, грн/т	1053,76
Економічний ефект від приросту вартості, грн/т	906,54
Максимальне річне навантаження, т	1 000
Економія витрат при максимальному річному виробітку, грн/рік	906 544
Строк окупності капітальних вкладень, років	0,18

10

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У першому розділі на основі аналізу вітчизняних і зарубіжних джерел встановлено, що традиційні технології утилізації гною та посліду (буртування, пасивне компостування, тривале зберігання у гноєсховищах) є надто тривалими, супроводжуються значними втратами азоту, виділенням шкідливих газів та не гарантують стабільної санітарної якості компосту. Показано актуальність технологій аеробного компостування з примусовою аерацією соломо-гнойових сумішей, які дозволяють скоротити тривалість ферментації, підвищити температуру в товщі бурта, поліпшити агрохімічні показники та санітарний стан органічних добрив.

2. У другому розділі теоретично обґрунтовано процес руху та розподілу повітряного потоку в соломо-гнойовій масі при подачі через перфоровані горизонтальні труби. Побудовано математичні моделі розподілу повітря в поперечному та поздовжньому перерізах бурта, визначено залежності між кроком розміщення отворів, висотою перетину конічних струменів і кроком укладання труб. Отримано аналітичні вирази для зміни швидкості повітря вздовж труби та діаметра отворів залежно від координати, що дозволило задати раціональні конструктивні параметри аераційної системи й забезпечити максимально рівномірну аерацію об'єму бурта.

3. У третьому розділі розроблено конструкцію установки для примусової аерації гнойових буртів, яка містить компресор із ресивером, колектор та систему перфорованих пластикових труб. Запропоновано технологічну схему прискореного компостування з порційною подачею повітря, придатну для впровадження на існуючих гноєнакопичувальних майданчиках без кардинальної реконструкції. Обґрунтовано вибір основних елементів та режимів роботи установки, показано конструктивні переваги порційної подачі повітря (відсутність потреби у ворошінні бурта, можливість роботи під плівковим укриттям, зменшення енерговитрат у порівнянні з безперервною аерацією).

4. Проведено експериментальні дослідження на модельних буртах (ящиках) для оцінки впливу кількості рядів отворів, частоти обробок повітрям на температурний режим і мікробіологічні показники соломо-гнойової суміші. За результатами багатофакторного планування (типу Бокса–Бенкена) встановлено, що оптимальними є труби з трьома рядами отворів, однократна обробка суміші повітрям протягом доби та не менше трьох обробок на тиждень. Показано, що за таких режимів температура в товщі навозу стабільно досягає термофільного рівня (понад 50 °C), формується більш рівномірне температурне поле, що забезпечує інтенсифікацію ферментації, зниження загальної мікробної забрудненості, інактивацію патогенних мікроорганізмів, яєць і личинок гельмінтів, поліпшення санітарної якості компосту.

5. У п'ятому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування застосування розробленої установки примусової аерації гнойових буртів з урахуванням сучасних цін на мінеральні добрива та електроенергію і різних варіантів річного навантаження. Встановлено, що за рахунок підвищення вмісту азоту, фосфору та калію приріст вартості 1 т органічних добрив становить орієнтовно 1,0–1,1 тис. грн/т, тоді як питомі експлуатаційні витрати істотно менші за отриманий додатковий ефект. Розрахований строк окупності капітальних вкладень не перевищує 1 року навіть за відносно невеликого річного обсягу компостування, що свідчить про високу економічну доцільність і перспективність впровадження розробленої технології на тваринницьких підприємствах різного масштабу.