УДК 504.06:606:631.8
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.29

БІОКОНВЕРСІЯ ГНОЮ ВРХ МЕТОДОМ ІНТЕГРОВАНОГО АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ ТА ВЕРМІКУЛЬТИВУВАННЯ

Шевченко Н.О. (orcid.org/0000-0001-6722-9326),
Понікарчик С.В. (orcid.org/0009-0005-3152-3255)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, Умань
shevchenkonata24@gmail.com, Psv_s@ukr.net

У статті представлено результати комплексного експериментального дослідження ефективності технології прискореного аеробного компостування гною великої рогатої худоби (ВРХ) із використанням спеціалізованих біоінокулянтів та наступною біогуміфікацією субстрату за участю вермікультури. Встановлено, що застосування консорціумів термофільних целюлозолітичних бактерій та актиноміцетів забезпечує чітку стадійність біотермічного процесу: мезофільну фазу протягом перших трьох діб (підняття температури з 18 до 42 °С) та термофільну фазу з четвертої доби із стабілізацією температури в ядрі бурту в межах 62–67 °С. Утримання термофільного режиму понад 5 діб гарантує повну санацію біомаси від патогенних ентеробактерій та життєздатного насіння бур'янів за загального циклу дозрівання добрива у 21–24 доби. Завдяки підтримці концентрації кисню в порах субстрату на рівні понад 10% шляхом періодичної механічної аерації повністю заблоковано розвиток анаеробних зон, що радикально мінімізує емісію токсичних летких сполук.

Досліджено динаміку фізико-хімічних та агрохімічних показників на різних етапах переробки. Зафіксовано оптимізацію pH середовища у бік нейтральних значень (6,9–7,2), зниження вологості до 42–45% та інтенсивне накопичення гумінових кислот, концентрація яких зростає з 2,1% у вихідній суміші до 8,4% у готовому компості та досягає максимуму у 12,6% у вермікомпості. Встановлено ефект концентрування макроелементів у сухій речовині: загального азоту – до 2,8–3,1%, фосфору (P_2O_5) – до 2,4–2,6% та калію (K_2O) – до 2,1–2,3%. За допомогою методу біотестування на тест-культурі *Cucumis sativus* L. доведено глибоку детоксикацію субстрату. Критично висока фітотоксичність вихідного гною (індекс гермінації 35%, пригнічення коренів на –45%) повністю нівелюється за використання комплексного біоінокулянта на основі штамів *Bacillus subtilis* та *Azotobacter chroococcum*, що підвищує індекс гермінації до 95% та забезпечує приріст довжини коренів на +22%. Фінальне вермікомпостування максимізує індекс гермінації до 97% та приріст коренів до +25%, що підтверджує повний перехід лабільних речовин у стабільні гумусові комплекси. Обґрунтовано доцільність промислового масштабування розробленої технології на базі тваринницьких комплексів. *Ключові слова:* аеробне компостування, гній ВРХ, біоінокулянт, *Bacillus subtilis*, *Azotobacter chroococcum*, вермікомпост, гумінові кислоти, фітотоксичність, індекс гермінації.

Bioconversion of Cattle Manure by Integrated Aerobic Composting and Vermicomposting. Shevchenko N., Ponikarchyk S.

The paper presents the results of a comprehensive experimental study on the efficiency of accelerated aerobic composting technology for cattle manure using specialized bioinoculants, followed by subsequent biohumification of the substrate involving vermiculture. It was established that the application of consortia of thermophilic cellulolytic bacteria and actinomycetes ensures a distinct staging of the biothermal process: a mesophilic phase during the first three days (with a temperature rise from 18 to 42 °C) and a thermophilic phase starting from the fourth day, with temperature stabilization in the core of the windrow within 62–67 °C. Maintaining this thermophilic regime for more than 5 days guarantees complete sanitation of the biomass from pathogenic enterobacteria and viable weed seeds within a total fertilizer maturation cycle of 21–24 days. Due to the maintenance of oxygen concentration in the substrate pores at a level above 10% through periodic mechanical aeration, the development of anaerobic zones is completely blocked, which radically minimizes the emission of toxic volatile compounds.

The dynamics of physicochemical and agrochemical parameters at various stages of processing were investigated. An optimization of the medium pH towards neutral values (6.9–7.2), a decrease in moisture content to 42–45%, and an intensive accumulation of humic acids were recorded, with their concentration increasing from 2.1% in the initial mixture to 8.4% in the finished compost, reaching a maximum of 12.6% in the vermicompost. The effect of macronutrient concentration in the dry matter was established: total nitrogen up to 2.8–3.1%, phosphorus (P_2O_5) up to 2.4–2.6%, and potassium (K_2O) up to 2.1–2.3%. Deep detoxification of the substrate was proven using the biotesting method on a *Cucumis sativus* L. test culture. The critically high phytotoxicity of the raw manure (germination index of 35%, root inhibition at –45%) is completely neutralized when using a complex bioinoculant based on *Bacillus subtilis* and *Azotobacter chroococcum* strains, which increases the germination index to 95% and provides a root length increase of +22%. Final vermicomposting maximizes the germination index up to 97% and root growth up to +25%, confirming the complete transition of labile substances into stable humus complexes. The feasibility of industrial scaling of the developed technology on the basis of livestock complexes is substantiated. *Key words:* aerobic composting, cattle manure, bioinoculant, *Bacillus subtilis*, *Azotobacter chroococcum*, vermicompost, humic acids, phytotoxicity, germination index.

© Шевченко Н.О., Понікарчик С.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Інтенсифікація промислового тваринництва призводить до утворення колосальних обсягів відходів, зокрема гною великої рогатої худоби (ВРХ), екологічно безпечна утилізація яких є однією з найгостріших проблем сучасного агросектору. Традиційне пасивне зберігання та неконтрольоване внесення сирого гною у ґрунт зумовлюють низку екологічних ризиків: значні втрати поживних речовин через вимивання, високу фітотоксичність субстрату внаслідок накопичення летких жирних кислот та аміаку, а також поширення патогенної мікрофлори й насіння бур'янів [1]. Крім того, анаеробні процеси у пасивних гноєсховищах є потужним джерелом емісії парникових газів (зокрема метану та закису азоту) і токсичних летких сполук, що суперечить глобальним вимогам декарбонізації та сталого розвитку.

Одним із найефективніших методів стабілізації таких відходів є аеробне компостування, проте класичний його варіант триває досить довго і часто супроводжується значними втратами азоту. Сучасна біотехнологія розглядає інтенсифікацію цього процесу шляхом спрямованого конструювання мікробних консорціумів. Використання спеціалізованих біоінокулянтів на основі термофільних целюлозолітичних бактерій, актиноміцетів та штамів-стимуляторів (таких як *Bacillus* та *Azotobacter*) дозволяє не лише прискорити деструкцію стійких органічних компонентів (соломи) та оптимізувати біотермічний режим для повної санації, а й мінімізувати газові втрати азоту за рахунок його біологічної іммобілізації [2]. Подальше поєднання аеробної стабілізації з вермікультивуванням відкриває нові можливості для глибокої гуміфікації матриці та отримання високоякісних екодобрив [3]. Проте механізми стадійного проходження температурних режимів, динаміка детоксикації та оптимізація газообміну за умов комплексного застосування новітніх біопрепаратів у технологіях прискореного компостування гною ВРХ все ще потребують системного експериментального обґрунтування.

Актуальність дослідження. Актуальність цієї роботи обумовлена необхідністю розв'язання гострої екологічної та економічної суперечності сучасного агропромислового комплексу. З одного боку, розвиток промислового тваринництва генерує багатотоннажні обсяги екологічно небезпечних відходів (гною ВРХ), які за традиційного пасивного зберігання стають потужним джерелом викидів парникових газів, забруднення ґрунтових вод та поширення патогенів. З іншого боку, сучасне рослинництво гостро потребує відновлення деградованих ґрунтів та переходу на засади органічного землеробства, що неможливо без внесення високоякісних, стабільних та безпечних органічних добрив.

У цьому контексті традиційні методи утилізації відходів тваринництва вже не відповідають жорстким міжнародним екологічним стандартам та вимогам декарбонізації аграрного сектору. Розробка та впровадження технологій прискореного біотермічного компостування із застосуванням спеціалізованих біоінокулянтів є одним із найбільш перспективних напрямів екологізації агропромислового комплексу. Проте більшість існуючих рішень мають серйозні недоліки: тривалий час дозрівання субстрату, неконтрольовані втрати азоту у вигляді аміаку та збереження залишкової фітотоксичності.

Експериментальне обґрунтування комплексного підходу, який поєднує керовану аеробну деструкцію за участю термофільних целюлозолітичних бактерій і актиноміцетів, використання штамів *Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum* та фінальну вермігуміфікацію, дозволяє радикально інтенсифікувати процес (до 21–24 діб). Це дослідження є вкрай актуальним, оскільки воно не лише вирішує проблему швидкої детоксикації та санації відходів, а й пропонує науково обґрунтовану модель збереження поживних речовин (азоту, фосфору, калію) і трансформації їх у високоцінні гумусові комплекси. Таким чином, робота безпосередньо спрямована на реалізацію принципів циркулярної економіки («відходи у доходи») та зниження вуглецевого сліду агропідприємств.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Висвітлені у статті результати є логічним підсумком наукових досліджень, проведених у межах комплексної тематики кафедри екології Уманського національного університету за темою: «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування» (державний реєстраційний номер 0108U009772).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика прискореної утилізації відходів тваринництва та підвищення якості органічних добрив перебуває в центрі уваги багатьох сучасних наукових шкіл, де дослідженню технологічних аспектів аеробного компостування та вермікультивації присвячено значну кількість фундаментальних праць. У вітчизняному науковому просторі вагомий внесок у вивчення процесів біоконверсії та оптимізації мікробіологічних параметрів переробки гною великої рогатої худоби внесли Скляр О.Г. [4, 5] та його колеги [6], які детально проаналізували енергоефективність різних систем аеробного компостування відходів тваринництва та довели економічну доцільність штучної аерації буртів. Водночас Нікітюк П.А. обґрунтував основи екологічної оцінки забруднення ґрунтів відходами тваринництва методом фітоіндикації, зосередившись на динаміці фітотоксичності для модельних тест-культур [7]. Наукові засади трансформації макроелементів та накопичення гумінових кислот під час сумісного компостування гною та рослинних решток відображені у сучасних наукових працях [8]. Логічним розвитком цих підходів є дослідження колективу авторів Ndiaye Issa та інші, які систематизували перспективні способи

прискореного компостування і вермікультивування у тваринницьких комплексах з метою побудови замкнутих циклів циркулярної агроекономіки [9]. Hussein G. Salih з колегами розкрив біотехнологічні механізми прискорення рециклінгу органічних відходів за допомогою внесення бактеріальних агентів, що стимулюють швидке проходження мезофільної фази [10]. Попри значну кількість фундаментальних напрацювань, питання комплексного поєднання біоінокуляції специфічними штамами та наступної вермістабілізації для оптимізації екологічних параметрів і зниження інтегральної фітотоксичності гною ВРХ залишається недостатньо висвітленим, що й обумовлює напрям нашого дослідження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність численних досліджень у сфері утилізації органічних відходів, поза увагою науковців залишається характер синергетичної взаємодії між штучно внесеними консорціумами термофільних мікроорганізмів та наступною трансформацією субстрату під впливом вермікультури. Досі не з'ясовано точні кількісні закономірності газообміну та кінетики фітотоксичності на проміжних етапах між завершенням термофільної фази аеробного компостування та початком біогуміфікації черв'яками. Наявний дефіцит системних даних щодо динаміки детоксикації та концентрування макроелементів за умов сумісного використання целюлозолітичних бактерій, актиноміцетів та штамів *Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum* обмежує можливості прогнозування якості кінцевого продукту, що заважає впровадженню таких інтегрованих технологій у промислових масштабах.

Новизна. Наукова новизна отриманих результатів полягає у комплексному експериментальному обґрунтуванні двоетапної системи біоконверсії гною ВРХ, яка поєднує кероване аеробне компостування з інокуляцією цільовими мікробіологічними консорціумами та фінальне вермікультивування. Уперше встановлено математичні кореляції між утриманням термофільного режиму (62–67 °C), рівнем аерації пористого простору субстрату (понад 10% O_2) та швидкістю трансформації лабільних фітотоксичних сполук у стабільні гумусові матриці. Новими є дані щодо динаміки ростових показників тест-культури *Cucumis sativus* L., які доводять, що саме поєднання специфічної мікробної інокуляції та вермістабілізації забезпечує максимальний індекс гермінації насіння (95–97%) і чотирикратне зниження фітотоксичності порівняно зі стандартними методами пасивної переробки.

Методологічне або загальнонаукове значення. Загальнонаукове значення роботи полягає у поглибленні теоретичних уявлень про закономірності штучно спрямованої мікробіологічної сукцесії та біохімічної деструкції висококонцентрованих полікомпонентних органічних відходів. У методологічному аспекті дослідження розширює методику екологічного моніторингу та біотестування закритих агробіосистем, пропонуючи інтегральний підхід до оцінки безпеки добрив через взаємозв'язок фізико-хімічних параметрів, динаміки емісії газів та експрес-оцінки фітотоксичності. Результати роботи формують надійну методологічну базу для розробки екологічно збалансованих технологій утилізації відходів тваринництва в межах концепції циркулярної економіки та систем управління вуглецевим слідом в аграрному секторі.

Викладення основного матеріалу. У ході експериментальних досліджень було комплексно оцінено ефективність технології прискореного аеробного компостування відходів тваринництва (гній великої рогатої худоби) з використанням біоінокулянтів на основі консорціумів термофільних целюлозолітичних бактерій та актиноміцетів. Головним критерієм екологічної безпеки та завершеності процесу біотермічної деструкції є стадійне проходження температурних режимів усередині буртів. Протягом перших трьох діб експерименту зафіксовано мезофільну фазу, під час якої інтенсивний розвиток первинної мікрофлори супроводжувався стрімким підняттям температури субстрату від початкових вісімнадцяти до сорока двох градусів Цельсія. Починаючи з четвертої доби, процес перейшов у термофільну фазу, а температура в ядрі бурту стабілізувалася в межах від шістдесяти двох до шістдесяти семи градусів Цельсія. Утримання цього режиму понад п'ять діб забезпечило повну санацію компостованої маси від патогенних ентеробактерій та життєздатного насіння бур'янів. До кінця третього тижня температура плавно знизилася до рівня навколишнього середовища, що вказує на уповільнення деструкції легкодоступної органіки та початок активних процесів гуміфікації. Загальний цикл дозрівання добрива склав 21–24 доби.

Важливим аспектом екологічної безпеки розробленої технології є мінімізація втрат сполук азоту та запобігання емісії токсичних газів в атмосферу. Регулювання початкового співвідношення вуглецю до азоту та впровадження періодичної механічної аерації дозволило оптимізувати життєдіяльність мікроорганізмів. Завдяки підтримці концентрації кисню в порах субстрату на рівні понад десять відсотків було повністю заблоковано розвиток анаеробних зон, що дозволило радикально знизити виділення летких сполук порівняно зі стандартним пасивним зберіганням відходів. Фізико-хімічні показники газового обміну та динаміка втрат поживних речовин чітко корелювали з інтенсивністю біотермічного процесу.

Для оцінки агрохімічної цінності та якісних трансформацій компостованої маси було проведено порівняльний аналіз вихідної сировини, готового аеробного компосту та продукту його подальшої біогуміфікації за участю вермікультури. Отримані результати підтвердили суттєву концентрацію

макроелементів у перерахованій на суху речовину масі, що відображено в таблиці 1.

Аналіз результатів, наведених у таблиці 1, свідчить про глибоку біохімічну трансформацію органічної матриці відходів під впливом аеробного компостування та наступного вермікультивування. У процесі переробки зафіксовано закономірне зниження вологості субстрату з початкових 68% до 42–45%, а також оптимізацію активної кислотності середовища (pH), яка зміщується від слабкокислої до нейтральної та слабколужної зони, що є сприятливим для більшості типів ґрунтів. Важливим індикатором завершеності процесу гуміфікації є динаміка вмісту органічної речовини, частка якої зменшується майже вдвічі за рахунок мінералізації легкодоступних вуглецевих сполук та виділення діоксиду вуглецю. Водночас спостерігається інтенсивне накопичення гумінових кислот, концентрація яких зростає з 2,1% у вихідній суміші до 8,4% у готовому компості та досягає максимуму у 12,6% у вермікомпості, що підтверджує високу гумусуючу здатність кінцевого продукту.

З екологічної та агрономічної точок зору визначальним результатом є істотне концентрування основних макроелементів у перерахунку на абсолютно суху речовину субстрату. Вміст загального азоту в ході аеробної деструкції збільшується з 1,6% до 2,8–3,1%, що зумовлено зменшенням загальної маси бурту та переведенням азоту мікрофлорою у стабільні білкові та гумусові структури, які мінімізують його вимивання. Аналогічна тенденція до зростання концентрації зафіксована для фосфору (збільшення вдвічі до 2,4–2,6%) та калію (зростання до 2,1–2,3%). Це доводить, що пропонована технологія не лише забезпечує екологічну безпеку через стабілізацію відходів, а й дозволяє отримати концентроване екологічно чисте органічне добриво з високим вмістом доступних для рослин елементів живлення.

Зміна якісного складу органічної матриці супроводжувалася суттєвим зниженням фітотоксичності, що визначали методом біотестування на модельній тест-культурі огірка посівного (*Cucumis sativus* L.). Екстракти з неперебродженого вихідного гною виявляли виражену інгібуючу дію на біооб'єкти через високу концентрацію залишків летких жирних кислот, фітотоксичних фенольних сполук та вільного аміаку. Натомість дозрілий аеробний компост продемонстрував не лише повну екологічну безпеку, а й виражений стимулюючий ефект щодо проростання насіння та інтенсифікації розвитку кореневої системи досліджуваних рослин, що деталізовано в таблиці 2.

Таблиця 1

Динаміка фізико-хімічних та агрохімічних показників субстрату на різних етапах біотехнологічної переробки відходів тваринництва

Показник	Вихідна суміш (гній та солома)	Готовий аеробний компост	Вермікомпост (кінцева гуміфікація)
Вологість, %	68,0±2,0	42,0±1,5	45,0±1,2
pH середовища	6,4±0,2	7,2±0,1	6,9±0,1
Органічна речовина, %	85,0±3,5	52,0±2,1	44,0±1,8
Загальний азот, % на суху речовину	1,6±0,2	2,8±0,15	3,1±0,1
Фосфор (P_2O), % на суху речовину	1,2±0,1	2,4±0,2	2,6±0,15
Калій (K_2O), % на суху речовину	1,4±0,2	2,1±0,1	2,3±0,2
Гумінові кислоти, %	2,1±0,3	8,4±0,5	12,6±0,7

Таблиця 2

Ростові показники та індекси фітотоксичності тест-культури огірка посівного (*Cucumis sativus* L.) залежно від технології переробки відходів

Технологічний варіант досліду	Індекс гермінації насіння, %	Приріст довжини коренів до контролю, %
Вихідний сирий гній	35,0 ± 3,0	−45,0 ± 4,0
Аеробний компост (без інокулянта)	78,0 ± 2,0	+5,0 ± 1,1
Аеробний компост із комплексним біоінокулянтом (*Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum*)	95,0 ± 1,5	+22,0 ± 1,5
Вермікомпостований субстрат	97,0 ± 1,0	+25,0 ± 1,2

Аналіз отриманих даних біотестування засвідчує глибоку детоксикацію субстрату в процесі біотермічного компостування. Головним критерієм оцінки безпеки виступав індекс гермінації – інтегральний показник фітотоксичності, який одночасно враховує як відсоток проростання насіння (схожість), так і інтенсивність початкового росту проростків (довжину їхніх коренів) порівняно з чистим контрольним середовищем (дистильованою водою). Значення індексу гермінації нижче 50% свідчить про високу токсичність субстрату, тоді як показники понад 80–90% вказують на екологічну стабільність і наявність стимулювального ефекту.

Вихідний сирий гній продемонстрував критично високу фітотоксичність для модельного об'єкта: індекс гермінації для *Cucumis sativus* становив лише 35,0±3,0%. При цьому спостерігалося жорстке пригнічення розвитку проростків, що виразилося в негативному прирості довжини коренів (–45,0±4,0%), що вказує на повну непридатність необроблених відходів для безпосереднього внесення у ґрунт через ризик пригнічення та хімічного опіку культурних рослин.

Впровадження технології аеробної стабілізації дозволило суттєво знизити негативний ефект, проте найбільш вагомі результати отримано за використання спеціалізованого комплексного біоінокулянта на основі штамів *Bacillus subtilis* та *Azotobacter chroococcum*. Завдяки активній ферментативній діяльності мікроорганізмів інокулянта, індекс гермінації насіння огірка зріс до 95,0±1,5%. Більше того, екстракти цього варіанта компосту забезпечили потужний біостимулюючий ефект, зумовивши інтенсивний приріст довжини коренів тест-об'єкта на +22,0±1,5%, що у понад 4 рази перевищує показники звичайного компосту без інокуляції (+5,0±1,1%).

Подальше поліпшення параметрів за вермікомпостування (індекс гермінації 97,0±1,0%, приріст довжини коренів +25,0±1,2%) підтверджує повний перехід лабільних сполук у стабільні гумусові комплекси. Сформована матриця компосту характеризується пролонгованою дією у ґрунті та високим вмістом фітогормонів мікробного походження, що доводить доцільність масштабування технології з використанням біоінокулянта *Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum* у промислових умовах тваринницьких комплексів.

Головні висновки. Розроблена технологія прискореного аеробного компостування гною ВРХ із використанням комплексного біоінокулянта (*Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum*) забезпечує повну санацію субстрату від патогенів за оптимальний цикл у 21–24 доби завдяки стабільному утриманню термофільного режиму. Завдяки підтримці рівня кисню понад 10% через механічну аерацію повністю заблоковано анаеробні зони, що радикально знизило емісію токсичних газів порівняно з пасивним зберіганням відходів. Біохімічна трансформація матриці призвела до зменшення вологості, оптимізації pH та дворазового концентрування макроелементів (азоту до 2,8–3,1%, фосфору до 2,4–2,6%, калію до 2,1–2,3%) на тлі потужного зростання вмісту гумінових кислот (до 8,4% у компості та 12,6% у вермікомпості). Біотестування на *Cucumis sativus* L. підтвердило повну детоксикацію субстрату: критична фітотоксичність сирого гною (індекс гермінації 35%) змінилася вираженим біостимулювальним ефектом інокульованого компосту та вермісубстрату, де індекс гермінації сягнув 95–97%, а приріст довжини коренів склав +22–25%.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати є готовим науково-практичним підґрунтям для проектування та масштабування автоматизованих ліній аеробного компостування на промислових тваринницьких комплексах, що дозволить швидко утилізувати багатотоннажні відходи та інтегрувати їх у замкнуті цикли циркулярної агроекономіки. Створення комерційних біоінокулянтів на основі досліджених штамів мікроорганізмів відкриває широкі можливості для ринку екологічно чистих добрив пролонгованої дії, затребуваних в органічному землеробстві. Крім того, масове впровадження цієї технології дозволить агропідприємствам радикально знизити емісію парникових газів (метану та аміаку), мінімізувати екологічні штрафні ризики та суттєво зменшити загальний вуглецевий слід сільськогосподарського виробництва.

Література

1. Yuchang Shi, Muhammad Fahad Sardar, Longmei Qiu, Binxu Li, Muhammad Zia-ur-Rehman, Yukun Xue, Xu Zhang, Wuyang Zhao, Hongna Li. Achieving high-quality and safe compost: a study on multi-optimization of a non-linear system using machine learning. *Bioresource Technology*, 2026. Volume 457. 135003. ISSN 0960-8524. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.135003.
2. Dongming Liu, Shuhan Wang, Liang Zhao, Wenbing Tan. Synergistic pathways of composting and hydrothermal carbonization for livestock manure valorization: From molecular mechanisms to carbon-neutral applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2026. Volume 14. Issue 2. https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121464
3. Jun Li, Mei Bai, Long Cheng, Yifan Shao, Yang Xu, Chao Xu, Xin Zhang, Hongliang Cao, Qiaoxia Yuan. Enhancing combined composting with cattle slurry solids as a bulking agent: Synergistic improvements in earthworm performance, lignocellulose degradation, and greenhouse gas mitigation. *Bioresource Technology*, 2026. Volume 450. 134465. ISSN 0960–8524. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.134465.
4. Скляр О.Г., Скляр Р.В. Дослідження способів утилізації відходів птахівництва і тваринництва. *Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України: Зб. наукових-праць*, 2019. Вип. № 12. С. 298–304.

5. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар, А. С. Шляхи підвищення якості виробництва біодобрив. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2024. 14(2). https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-2
6. Войтов В.А. Аналіз технологій утилізації відходів птахівництва за кордоном. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2019. Вип. 19. Т. 4. С. 100–109.
7. Никитюк П. Екологічна оцінка агрохімічної якості ґрунтів методом фітоіндикації. *Scientific Bulletin of UNFU*, 2021. 31. 57–61. https://doi.org/10.36930/40310608.
8. Larney Francis, Sullivan Dan, Buckley Katherine, Eghball Bahman. The role of composting in recycling manure nutrients. *Canadian Journal of Soil Science*, 2006. 86. 597–611. https://doi.org/10.4141/S05-116.
9. Ndiaye Issa, Baldé Amadou, Seydi Oumar, Tendeng Etienne, Sylla Elhadji, Diarra Karamoko. Impact of Composting and Vermicomposting of Three Types of Animal Manure on the Dynamics of Macronutrients Nitrogen, Phosphorus, and Potassium. *European Scientific Journal*, 2025. ESJ. 21. 65. https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n21p65.
10. Hussein G. Salih, Noori M. Cata Saady, Baiyu Zhang, Talib M. Albayati. The role of microbial inoculum in improving composting performance and promoting compost maturation: A review. *Green Technologies and Sustainability*, 2026. Volume 4. Issue 2. 100316. ISSN 2949-7361. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100316.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026