УДК 504.06:628.477:631.86
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.6

ЕКОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА НА ДОВКІЛЛЯ У ПРОЦЕСІ БІОКОМПОСТУВАННЯ

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, м. Умань
shevchenkonata24@gmail.com, Psv_s@ukr.net

Висвітлено результати експериментальних досліджень щодо обґрунтування та апробації екобезпечних технологічних параметрів біокомпостування відходів тваринництва із залученням вітчизняного біопрепарату-деструктора та природного мінерального сорбенту. Методологічне значення роботи полягає у розробці комплексного підходу до оцінки екологічної безпеки та біохімічної зрілості органічних добрив, що базується на поєднанні гравіметричного балансу маси, моніторингу біотермічної динаміки, визначення агрохімічних показників та електропровідності. У контрольованому модельному досліді оцінено чотири варіанти компостування суміші підстилкового гною великої рогатої худоби та пташиного посліду протягом 45-добового циклу: пасивне компостування (контроль), аеробне з механічним ворошінням, інокуляція біопрепаратом «Екостерн» та оптимізована екотехнологія з комбінованим застосуванням «Екостерну» і Сокирницького клиноптилолітового цеоліту.

Встановлено, що застосування оптимізованої екотехнології забезпечує виражену оптимізацію біотермічної динаміки, скорочуючи початкову мезофільну фазу з 24,4 % до 8,9 % та розширюючи термофільну фазу санітарної гігієнізації (55–68ºС) до 48,9 % від загального циклу, що гарантує надійну дезінфекцію субстрату від патогенів і насіння бур'янів. Аналіз засвідчив скорочення газоподібних втрат органічної речовини більше ніж удвічі (до 13,0 %) та досягнення максимального виходу стабілізованого компосту (62,0 % від вихідної маси). Фінальний фізико-хімічний аналіз (45-та доба) підтвердив високий ступінь зрілості та екологічної безпеки отриманого продукту у варіанті з цеолітом і біопрепаратом: досягнуто оптимальне співвідношення C:N (11,8), зростання зольності до 54,5 %, нейтралізацію реакції середовища та зниження електропровідності до 1,5 мСм/см. Отримані параметри свідчать про іммобілізацію біогенних елементів у стійкі форми, відсутність фітотоксичності та надлишкового сольового стресу. Запропонована експериментальна модель слугує універсальною методологічною основою для наукового обґрунтування технологій утилізації інших видів агропромислових відходів. *Ключові слова:* біокомпостування, відходи тваринництва, цеоліт, біопрепарат «Екостерн», біотермічна динаміка, термофільна фаза, зрілість компосту.

Ecological and Technological Foundations for Minimizing the Negative Impact of Livestock Waste on the Environment during Biocomposting. Shevchenko N., Ponikarchyk S.

The results of experimental studies on the justification and testing of ecologically safe technological parameters for the biocomposting of livestock waste using a domestic biological inoculant-decomposer and a natural mineral sorbent are presented. The methodological significance of the work lies in the development of an integrated approach to assessing the environmental safety and biochemical maturity of organic fertilizers, based on a combination of mass balance analysis, monitoring of biothermal dynamics, determination of agrochemical indicators, and electrical conductivity. In a controlled model experiment, four options for composting a mixture of cattle bedding manure and poultry manure were evaluated over a 45-day cycle: passive composting (control), aerobic composting with mechanical turning, inoculation with the bio-inoculant "Ekostern", and an optimized eco-technology combining "Ekostern" with Sokyrnytskyi clinoptilolite zeolite.

It was established that the application of the optimized eco-technology provides a pronounced optimization of biothermal dynamics, reducing the initial mesophilic phase from 24.4% to 8.9% and extending the thermophilic phase of sanitary hygienization (55–68ºC) to 48.9% of the total cycle, which guarantees reliable disinfection of the substrate from pathogens and weed seeds. Mass balance analysis revealed a reduction in gaseous losses of organic matter by more than half (down to 13.0%) and the achievement of maximum yield of stabilized compost (62.0% of the initial mass). Final physicochemical analysis (day 45) confirmed a high degree of maturity and environmental safety of the product obtained in the variant with zeolite and bio-inoculant: an optimal C:N ratio (11.8) was achieved, ash content increased to 54.5%, the medium reaction was neutralized, and electrical conductivity decreased to 1.5 mS/cm. The obtained parameters indicate the immobilization of biogenic elements into stable forms, as well as the absence of phytotoxicity and excessive salt stress. The proposed experimental model serves as a universal methodological framework for the scientific substantiation of recycling technologies for other types of agro-industrial waste. *Key words:* biocomposting, livestock waste, zeolite, "Ekostern" bio-inoculant, biothermal dynamics, thermophilic phase, compost maturity.

Постановка проблеми. Екологічна сутність проблеми утилізації відходів тваринництва полягає у формуванні високого рівня антропогенного тиску на всі компоненти довкілля через високу біологічну та хімічну агресивність свіжого гною великої рогатої худоби та пташиного посліду. Неконтрольоване накопичення цієї біомаси супроводжується інтенсивним виділенням в атмосферне повітря парникових та токсичних газів, зокрема метану, діоксиду вуглецю, аміаку та сірководню, що суттєво погіршує якість

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

повітряного басейну зони впливу та робить внесок у глобальні кліматичні зміни [1, 2]. Одночасно виникає високий ризик евтрофікації та токсикологічного забруднення гідросфери внаслідок змиву дощовими й талими водами або фільтрації у підземні водоносні горизонти розчинних сполук азоту, фосфору, фенольних сполук і важких металів, що спричиняє деградацію водних екосистем та унеможливлює використання питної води із колодязів й неглибоких свердловин [3]. У педосфері систематичне внесення непідготовленого або неналежно компостованого субстрату призводить до підлужування чи засолення ґрунтів, пригнічення природного мікробіоценозу та порушення ґрунтового поглинаючого комплексу через надлишок іонів амонію й вільних солей [4]. Додатковим аспектом біологічної небезпеки є наявність у свіжих відходах патогенних мікроорганізмів, яйця гельмінтів та життєздатного насіння бур'янів, що створює загрозу поширення зоонозних інфекцій і погіршення фітосанітарного стану агроландшафтів [5].

Актуальність дослідження. Актуальність даного дослідження зумовлена стрімким нарощуванням обсягів утворення відходів тваринницького комплексу, зокрема підстилкового гною великої рогатої худоби, неконтрольоване накопичення яких створює загрозу катастрофічного антропогенного навантаження на довкілля. Традиційні методи поводження з такими висококонцентрованими органічними відходами у стаціонарних буртах без належного регулювання аеробних та мікробіологічних процесів супроводжуються інтенсивною емісією токсичних газів, вимиванням біогенних елементів у підземні води та поширенням патогенної мікрофлори, що призводить до деградації локальних агроландшафтів. У зв'язку з цим критично необхідним є наукове обґрунтування та розробка інноваційних, екобезпечних технологій біодеструкції, спрямованих на керовану трансформацію органічної сировини у високоякісні і безпечні органічні добрива.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Публікацію та експериментальні розробки здійснено в процесі реалізації кафедральної тематики Уманського національного університету «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування» (номер державної реєстрації 0108U009772).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній екологічній науці та практиці природокористування проблема розробки екобезпечних технологій переробки і утилізації відходів тваринництва розглядається як один із визначальних пріоритетів забезпечення екологічної безпеки держави та реалізації концепції сталого розвитку агропромислового комплексу [6, 7]. Масштабне накопичення відходів тваринницьких підприємств створює системну загрозу для екологічної стійкості агроландшафтів, що вимагає переходу від традиційних, екологічно ризикованих методів їх видалення до науково обґрунтованих, ресурсозберігаючих біотехнологічних рішень замкненого циклу.

Теоретико-методологічні та практичні аспекти аеробного компостування органічних відходів, оцінки їхнього впливу на навколишнє природне середовище та оптимізації родючості ґрунтів висвітлено у фундаментальних працях багатьох вітчизняних і зарубіжних науковців [8, 9]. Аналіз зарубіжного досвіду [10, 11] свідчить про активний розвиток напряму біоаугментації та використання природних мінеральних ресурсів для мінімізації антропогенного навантаження на довкілля у процесі утилізації відходів. У сучасних публікаціях міжнародних дослідницьких груп акцентується увага на застосуванні спеціалізованих мікробіологічних консорціумів для оптимізації біотермічного режиму та надійного знезараження субстратів від патогенної мікрофлори [12].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Більшість існуючих технологічних рішень базується на ізольованому використанні або мікробіологічних інокулянтів, або мінеральних сорбентів, що не дозволяє досягти максимального синергетичного ефекту в оптимізації часової структури біотермічних фаз.

Новизна. У роботі вперше на теоретичному та експериментальному рівнях обґрунтовано еколого-технологічні параметри спрямованої біодеструкції підстилкового гною великої рогатої худоби та пташиного посліду за умов синергетичної дії вітчизняного мікробіологічного інокулянта «Екостерн» та природного Сокирницького клиноптилолітового цеоліту. Зокрема, поглиблено наукові уявлення про закономірності трансформації азотовмісних сполук і мінералізації органічної речовини, доведено механізми суттєвого скорочення початкової мезофільної фази та пролонгації термофільного етапу санітарної гігієнізації субстрату.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення проведених досліджень полягає у розробці та апробації комплексного методичного підходу до оцінки екологічної безпеки і біохімічної зрілості органічних добрив, що базується на поєднанні гравіметричного балансу маси, моніторингу біотермічної динаміки, визначення агрохімічних показників та електропровідності. Запропонована експериментальна модель може бути використана як універсальна методологічна основа для наукового обґрунтування технологій утилізації інших видів агропромислових відходів.

Викладення основного матеріалу. Експериментальні дослідження з обґрунтування екобезпечних технологічних параметрів біокомпостування відходів тваринництва здійснювали в умовах контрольованого модельного досліду. Як вихідний субстрат використовували суміш підстилкового

гною великої рогатої худоби та пташиного посліду з початковою вологістю 65–68 % і співвідношенням вуглецю до азоту (C:N) на рівні 28,4. Порівняльну оцінку інтенсивності біотермічних процесів та екологічної ефективності трансформації органічної речовини проводили за чотирма технологічними варіантами.

У першому варіанті, який слугував контролем, моделювали традиційне пасивне компостування у буртах без застосування механічного аерування та інокулянтів. Другий варіант передбачав проведення аеробного компостування з регулярним механічним ворошінням субстрату для оптимізації кисневого режиму. У третьому варіанті до вихідної компостної суміші вносили вітчизняний біопрепарат-деструктор органічних решток «Екостерн» (виробник ПП «БТУ-Центр», Україна) у робочій дозі 1 % від загальної маси субстрату для прискорення деструкції. У четвертому варіанті реалізовували оптимізовану екологізовану технологію, яка передбачала комбіновану дію біопрепарату «Екостерн» та природного мінерального сорбенту українського походження – Сокирницького клиноптилолітового цеоліту фракції 1–3 мм у кількості 5 % від сухої маси субстрату з метою іммобілізації амонійного азоту та зниження газоподібних емісій.

Аналіз біотермічної динаміки засвідчив, що внесення біологічних інокулянтів та мінерального сорбенту суттєво змінює часову структуру температурних фаз, прискорюючи вихід субстрату на термофільний режим. Для графічної інтерпретації часових співвідношень проходження окремих етапів біодеструкції відносно загальної тривалості процесу було розраховано відносні частки кожної фази, представлені на рисунку 1.

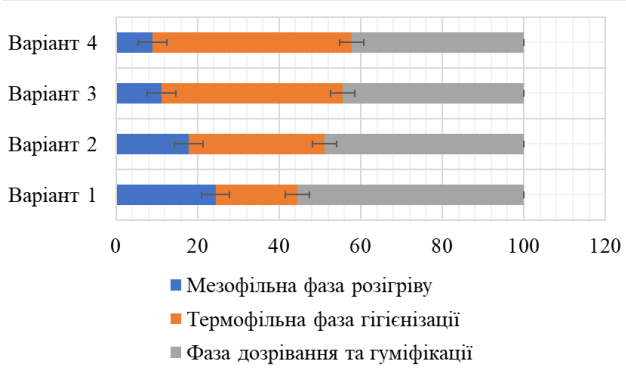

Рис. 1. Структура часового проходження температурних фаз компостування, % від загального циклу (45 діб)

Застосування біологічних інокулянтів та природних мінеральних сорбентів суттєво оптимізує біотермічну динаміку процесу деструкції відходів тваринництва. Зокрема, у контрольному варіанті мезофільна фаза розігріву затягується до 24,4 % загального циклу, тоді як у фоновому режимі термічна гігієнізація є недостатньою. Натомість впровадження оптимізованої технології із використанням вітчизняного біопрепарату «Екостерн» та Сокирницького клиноптилолітового цеоліту (варіант 4) дозволяє скоротити початкову мезофільну фазу до 8,9 % і розширити термофільну фазу санітарної гігієнізації майже до половини тривалості всього циклу (48,9 %). Таке тривале утримання високих температур гарантує ефективне знезараження субстрату від патогенної мікрофлори, створюючи передумови для стабілізації органічної речовини й отримання високоякісного, екологічно безпечного органічного добрива.

Аналіз оцінки фізико-хімічних трансформацій вихідного субстрату у процесі аеробного компостування свідчить, що застосування досліджуваних технологічних прийомів суттєво змінює напрям і співвідношення між процесами мінералізації та гуміфікації органічної речовини, впливаючи на фінальний вихід готової продукції (рис. 2).

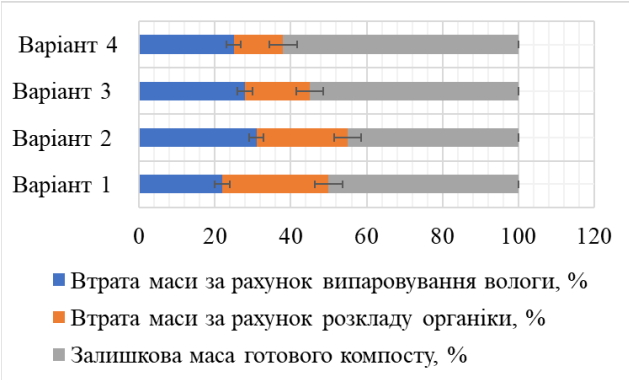

Рис. 2. Динаміка втрат маси та вологи під час компостування (% від початкової маси)

Аналіз балансу маси під час біокомпостування засвідчує, що пасивне компостування (варіант 1) та механічна аерація (варіант 2) супроводжуються високим рівнем непродуктивних втрат органічної речовини за рахунок її інтенсивного мінералізаційного розкладу, що зумовлює низький вихід готового субстрату.

Впровадження оптимізованої екотехнології із залученням вітчизняного біопрепарату-деструктора «Екостерн» та Сокирницького клиноптилолітового цеоліту (варіант 4) дозволяє знизити газоподібні втрати органіки більше ніж удвічі – до 13,0 %. Завдяки сорбційній ємності цеоліту та спрямованій мікробіологічній трансформації органічних сполук досягається максимальний вихід готового, стабілізованого за біохімічним складом компосту (62,0 % від вихідної маси), що підтверджує високу ресурсну та екологічну ефективність запропонованого рішення.

Важливим критерієм оцінки якості готового органічного добрива та його екологічної безпеки для

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 1

Фізико-хімічні та агрохімічні показники готового компосту (на 45-ту добу ферментації)

Варіант досліду	Рівень pH	Вологість, %	Зольність, %	Співвідношення C:N	Електро-провідність, мСм/см
Вихідна суміш	6,2±0,2	68,5±2,1	24,0±1,5	28,4±1,2	3,4±0,2
Варіант 1	7,8±0,3	45,0±1,8	42,5±2,0	18,2±0,9	2,5±0,1
Варіант 2	7,5±0,2	42,0±1,5	46,0±1,8	15,6±0,7	2,1±0,1
Варіант 3	7,2±0,2	39,5±1,4	51,0±2,1	13,4±0,6	1,8±0,1
Варіант 4	7,0±0,1	38,0±1,2	54,5±2,3	11,8±0,5	1,5±0,1

агроекосистем є комплексний аналіз фізико-хімічних і агрохімічних параметрів субстрату на фінальному етапі ферментації. Рівень реакції середовища, вологість, зольність, співвідношення вуглецю до азоту та електропровідність дозволяють об'єктивно охарактеризувати ступінь стабілізації органічної речовини, відсутність фітотоксичних сполук і готовність компосту до внесення у ґрунт. Дослідження цих показників дало змогу встановити глибину трансформаційних процесів у досліджуваних варіантах (табл. 1).

Аналіз отриманих результатів засвідчує, що застосування оптимізованої екотехнології із залученням вітчизняного біопрепарату «Екостерн» та Сокирницького клиноптилолітового цеоліту (варіант 4) забезпечує глибоку гуміфікацію та стабілізацію органічної речовини, про що свідчить зниження співвідношення вуглецю до азоту до оптимальних показників на рівні 11,8, а також зростання зольності до 54,5 %. На відміну від контрольного варіанта, де процес мінералізації не досягає повної стабілізації, комплексний біомінеральний вплив сприяє формуванню якісного гумусового продукту з високою агрономічною цінністю, здатного покращувати структуру ґрунтового поглинаючого комплексу без ризику виділення фітотоксичних продуктів неповного розкладу.

Водночас стабілізація рівня pH на нейтральних значеннях та зниження загальної електропровідності до 1,5 мСм/см у четвертому варіанті свідчать про відсутність надлишкової концентрації розчинних солей і вільних іонів амонію, здатних чинити деструктивний вплив на ґрунтовий мікробіоценоз і проростки культурних рослин. Завдяки високій іонообмінній ємності цеоліту та спрямованій мікробіологічній активності деструктора досягається надійна іммобілізація біогенних елементів у стійкі форми, що гарантує екологічну безпеку застосування отриманого компосту, виключає ризики вторинного забруднення агроландшафтів і створює надійні передумови для сталого функціонування агроекосистем.

Головні висновки. У ході проведення комплексних експериментальних досліджень щодо екобезпечних технологічних параметрів аеробного біокомпостування відходів тваринництва науково обґрунтовано та експериментально доведено ефективність застосування оптимізованої технології біодеструкції, яка базується на синергетичній дії вітчизняного мікробіологічного інокулянта «Екостерн» та природного Сокирницького клиноптилолітового цеоліту. Встановлено, що їх комплексне внесення змінює біотермічну динаміку процесу, дозволяє більше ніж удвічі знизити непродуктивні газоподібні втрати органіки та досягти максимального виходу стабілізованого гуміфікованого продукту.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані експериментальні дані та розроблені технологічні параметри створюють надійне теоретичне і прикладне підґрунтя для виробничого впровадження на підприємствах агропромислового комплексу з метою екологічно безпечної утилізації відходів тваринництва в умовах замкненого циклу. Застосування оптимізованого біомінерального компосту забезпечує відновлення гумусового балансу ґрунтів сільськогосподарського призначення, покращення структури ґрунтового поглинаючого комплексу та запобігання ризикам вторинного забруднення поверхневих і підземних вод біогенами.

Література

1. Massé D., Masse Lucie, Claveau Sonia, Benchaar Chaouki, Thomas O. Methane Emissions from Manure Storages. *Transactions of the ASABE*, 2008. 51. P. 1775–1781. https://doi.org/10.13031/2013.25311.
2. Cardenas Aura, Ammon Christian, Schumacher Britt, Stinner Walter, Herrmann Christiane, Schneider Marcel, Weinrich Sören, Fischer Peter, Amon Thomas, Amon Barbara. Methane emissions from the storage of liquid dairy manure: Influences of season, temperature and storage duration. *Waste Management*, 2021. 121. P. 393–402. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.026.
3. Česonienė Laima, Dapkiene Midona, Sileikiene Daiva. The impact of livestock farming activity on the quality of surface water. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019. 26. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3694-3.
4. Iraji Farida, Ballesta Jimenez, Mongil-Manso Jorge, Pellejero Graciela, Miguélez David, Najafi Payam, Trujillo-Gonzalez Juan. The effects of compost application on soil properties: Agricultural and environmental benefits. *International Journal Of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2025. https://doi.org/10.57647/ijrowa-2025-8144.
5. Amoah I.D., Adegoke A.A., Stenström T.A. Soil-transmitted helminth infections associated with wastewater and sludge reuse: a review of current evidence. *Trop Med Int Health*, 2018. 23. P. 692–703. https://doi.org/10.1111/tmi.13076.

6. Sorathiya Lalitchandra, Fulsoundar A., Tyagi Kuldeep, Patel Manish, Singh Rana. Eco-friendly and modern methods of livestock waste recycling for enhancing farm profitability. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2014. 3. https://doi.org/10.1007/s40093-014-0050-6.
7. Georgacakis D., Tsavdaris A., Bakouli J., Symeonidis S. Composting solid swine manure and lignite mixtures withselected plant residues. *Biores Technol*, 1996. 56. P.195–200.
8. Сакун А. О., Самойленко Н. М., Кутковий Д. О. Компостування як екологічно безпечний метод утилізації органічних відходів. *Аграрні інновації*, 2025. 33. С. 241–245. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.33.40.
9. Goyal S., Dhull S. K., Kapoor K. K. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresource Technology*, 2005. 96(14). https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.012.
10. Sagdeeva O., Krusir Galyna, Tsykalo A., Shpyrko T., Leuenberger Heinz. Composting of organic waste with the use of mineral additives. *Food Science and Technology*, 2018. 12. https://doi.org/10.15673/fst.v12i1.842.
11. Basak Biraj, Sarkar Abhijit, Saha Madhumonti, Kumar B., Rupesh T., Biswas Dipak, Bhattacharyya Ranjan, Mandal Debashis. Role of mineral additives in organic waste composting and its enrichment. Pedosphere, 2026. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2026.09.009.
12. Dang Hai, Le Phuoc-Cuong. *Influence of Microbial Inoculant on Composting of Biodegradable Domestic Solid Wastes*. 2021. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-475430/v1.

Дата першого надходження статті до видання: 20.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026