

БІОКОМПОСТУВАННЯ КУРЯЧОГО ПОСЛІДУ ЗА УЧАСТІ ІНТРОДУКОВАНИХ МІКРООРГАНІЗМІВ (огляд літератури)

Л. А. Шевченко¹, Г. І. Рябуха²

¹Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН
вул. Шевченка, 97; м. Чернігів, 14030, Україна; e-mail: shevchenkolyubov@ukr.net

²Національний університет «Чернігівська політехніка»
вул. Шевченка, 95; Чернігів, 14030, Україна

Мета. Здійснити аналіз літератури з питань мікробіологічних аспектів компостування загалом і курячого посліду зокрема. Порівняти особливості й наслідки компостування за участі резидентної мікробіоти та інтродукції до компостованого субстрату спеціально селекціонованих мікроорганізмів. **Методи.** Аналіз. Синтез. Узагальнення. **Результати.** Компостування курячого посліду — процес, який здійснюється для ферментації та стабілізації органічних відходів. Серед важливих наслідків компостування як способу переробки курячого посліду є знищення або суттєве зниження чисельності хвороботворних мікроорганізмів, трансформація Нітрогену і Карбону в стабільні органічні форми, зменшення об'єму відходів та покращення їхніх удобрювальних властивостей. Інокуляція курячого посліду ефективними селекціонованими мікроорганізмами є заходом, який стимулює проліферацію резидентних мікробних популяцій, збільшує в угрупованнях кількість мікробіоти, здатної генерувати бажані ферменти, а тому значно пришвидшує й покращує процес компостування. Нині розроблено технології компостування курячого посліду за участі екзогенних мікроорганізмів, які дозволяють розв'язати ключову проблему, пов'язану із втратами Нітрогену, що підвищує цінність посліду як джерела органічних добрив. Але велике видове та чисельне різноманіття аборигенної мікробіоти пташиного посліду ускладнює процес інтродукції агрономічно цінних мікроорганізмів до компостованого субстрату. Складність процесу компостування зумовлено також неможливістю узагальнити початкові властивості і склад посліду, які залежать від раціону годівлі птахів, умов господарювання на фермах тощо. **Висновки.** Проведений короткий аналіз ролі мікроорганізмів у компостуванні курячого посліду свідчить про необхідність обов'язкової оптимізації співвідношення Карбон/Нітроген у субстраті, врахування мікробіологічних аспектів процесу, важливість використання селекціонованих мікроорганізмів для покращення характеристик кінцевого продукту.

Ключові слова: біокомпостування, курячий послід, мікроорганізми, інокуляція.

Птахівництво — інтенсивна галузь сільськогосподарського виробництва, яка з кожним роком збільшує об'єми продукції, паралельно з цим зростає кількість пташиного посліду, який потребує швидкої переробки. Основну увагу спрямовано на переробку курячого посліду, що зумовлено насамперед обсягами його щорічного накопичення та хімічним складом — вміст N, P₂O₅, K₂O, CaO,

MgO вищий проти такого в качиному та гусячому посліді [1]. Неправильне і тривале зберігання курячого посліду може бути причиною серйозного забруднення довкілля. Збільшення рівня парникових газів, утворення неприємного запаху, накопичення важких металів і антибіотиків, забруднення ґрунту і ґрунтових вод, поширення хвороботворних мікроорганізмів та насіння бур'янів,

токсичні речовини — це лише частина негативних наслідків, до яких може призвести неправильне зберігання та поводження з курячим послідом. Одним із ефективних і агрономічно корисних методів розв'язання цієї проблеми є компостування — природний процес стабілізації органічних відходів, що дозволяє розв'язати питання захисту довкілля та утилізації побічної продукції сільськогосподарства. Крім того, варто зазначити, що саме курячий послід, як порівняти з гноєм інших тварин, містить більшу кількість поживних речовин (N — 2%; P — 1,5%; Ca — 3,5%), що робить його цінною сировиною для переробки на біоорганічні добрива для вирощування сільськогосподарських культур [50].

Питання утилізації пташиного посліду є відкритим. Пошук екологічних та економічно вигідних шляхів його переробки триває. Є певні розробки, пропозиції, практики застосування готових компостів, але загальної технології, яка б задовольняла більшість птахофабрик, не існує. Насамперед це пов'язано з різним типом ведення птахівництва у господарствах, що впливає на якість вихідної сировини, логістичними питаннями, часовим ресурсом, наявністю спеціально відведених місць та техніки для формування компостних куп чи розміщення біоконверсійних реакторів, а також культурою поводження з відходами.

Перетворення органічних відходів на стабільну органічну речовину, придатну для використання в полі без негативного впливу на довкілля, можливе завдяки компостуванню як екологічній та економічній альтернативі поводження з відходами. Правильне компостування ефективно знищує хвороботворні мікроорганізми й насіння бур'янів за допомогою тепла, що виділяється мікроорганізмами під час цього процесу.

Комплекс мікроорганізмів та факторів навколишнього середовища впливає на швидкість мінералізації органічної речовини. Здатність мікроорганізмів адаптуватися до зміни цих факторів робить процес компостування безперервним. З цієї та багатьох інших причин мікробіота компосту є одним із динамічних параметрів, які обов'язково вивчаються у процесі компостування. Механізми мінералізації органічної речовини є об'єктом дослідження для багатьох мікробіологів.

Отже, компостування є природним процесом ферментації органічної речовини за участі мікроорганізмів, який втім можливо пришвидшити шляхом застосування спеціальних інокулянтів, а також покращити якість кінцевого продукту. Але це питання і досі є дискусійним, по-перше, оскільки не всі науковці погоджуються з необхідністю застосування інокулянтів у принципі, по-друге, суперечки виникають внаслідок отримання сумнівних результатів [13; 17; 59]. У межах вивчення процесу компостування таку диференціацію думок серед дослідників можна пояснити складністю й великою різноманітністю біохімічних, фізичних, мікробіологічних процесів, що відбуваються під час компостування, та низкою факторів, які на нього впливають. Тому розробка способів/технологій отримання компосту як кінцевого безпечного стабільного продукту, зручного для транспортування і застосування як органічних добрив, потребує подальшого вивчення.

Курячий послід як основа компостованої суміші. Важливий вплив на початковий хімічний склад курячого посліду має раціон птахів, адже більша частина поживних речовин буде міститися саме у посліді, що пов'язано з низьким ступенем засвоєння поживних елементів організмом [28]. Основною складовою раціону травоядних тварин є рослинні вуглеводи, натомість корм для птахів має переважно білковий склад, відповідно різноманітність мікробіоти гною й курячого посліду також буде суттєво різнитися [61]. Високий рівень білків та амінокислот у пташиному посліді зумовлює формування значного пулу Нітрогену [65]. Водночас вміст Карбону є порівняно низьким. За дефіциту карбонвмісних сполук у субстраті спостерігаються значні втрати аміаку, що додатково може посилюватися низьким значенням рН та високотемпературними умовами. Саме тому для правильного (ефективного) компостування важливо підтримувати співвідношення C:N на рівні 25:1 [33; 50].

Рослинні рештки як додаткове джерело Карбону до компостованої суміші. Як відомо, Карбон для мікроорганізмів є джерелом енергії, яка вивільняється під час розщеплення складних карбонвмісних полімерів. Частина енергії, що виділяється як тепло, сприяє перебігу термофільної фази компостування, під час якої частина мікроорганізмів

мів, зокрема і патогенних, гине. Важливим є дотримання оптимального співвідношення Карбону та Нітрогену. За надлишку Карбону і нестачі Нітрогену процеси мінералізації відбуваються надто повільно. Якщо ж навпаки, переважає N, а C буде лімітований — мінералізація органічної речовини відбувається швидко, проте втрати газоподібних сполук Нітрогену зростають. Додавання органічних наповнювачів також сприяє оптимізації щільності та аерації суміші, впливає на механічну структуру компосту та його рН, значною мірою поглинає та утримує вологу, що попереджає як швидке висихання, так і вимивання $N-NO_3$ [8; 10].

Серед карбонвмісних субстратів для оптимізації компостування курячого посліду найчастіше використовується пшенична солома. Для отримання сировини однорідного розміру проводять її механічне подрібнення до розмірів ≈ 1 см [6]. Розмір фракцій наповнювача має важливе значення, оскільки це, окрім впливу на однорідність компосту, може позначитися на втратах Нітрогену під час компостування. Так, у роботі Баррінгтона зі співавт. [7] встановлено, що ступінь подрібнення наповнювача (неподрібнена і подрібнена солома пшениці та вівса) найбільше впливав на втрати Нітрогену, як порівняти з умістом вологи та режимом аерації.

Солома є порівняно недорогим та доступним матеріалом з високим вмістом Карбону. Водночас у роботі Мартіна зі співавт. [41] зазначено, що наповнювачі з високим вмістом лігніну (саме таким і є солома) сприяють подовженню періоду компостування, оскільки мікробіологічна трансформація лігніну є повільним процесом. Про часткове розкладання пшеничної соломи наприкінці компостування повідомляється також у роботі Чжана зі співавт. [70]. Тож з цього погляду солома є не найкращим матеріалом для компостування, оскільки доступність C, як відомо, відіграє ключову роль у процесі іммобілізації N.

Варто враховувати й біохімічні особливості рослин пшениці під час вибору її решток як наповнювача компосту. Гідрофобний восковий наліт, що залишається на соломі, перешкоджає адгезії клітин мікроорганізмів до її поверхні, забезпечуючи відносну стійкість до біодеградації [43], та сповільнює процеси мінералізації. Це формує потребу

пошуку та розробки ефективного способу модифікації соломи пшениці перед використанням у компостуванні.

Як джерело карбонвмісної добавки можуть використовуватися також тирса, скошена трава, кора дерев, опале листя або їх суміш [21; 56; 22]. Є досвід використання для компостування курячого посліду відходів ячменю, утворених під час приготування солоду [24].

Зважаючи на частку певних сільськогосподарських культур у системі сівозмін, рештки такої культури як кукурудза також можуть слугувати джерелом Карбону у процесі біокомпостування курячого посліду [62; 71]. У Мексиці, країні, яка займає п'яте місце у світі за виробництвом цукру, для компостування курячого посліду використовують шрот із цукрової тростини [49]. Також практикується внесення до компостованої суміші рисового лушпиння або деревної стружки [50]. Для багатьох країн актуальним питанням є утилізація або ж переробка рисової соломи, оскільки рис за посівними площами є домінуючою сільськогосподарською культурою [9]. Варто зазначити, що високий вміст SiO_2 (кремнезему) у рисовій соломі обмежує можливість її використання на корм тваринам, а процеси деструкції у ґрунтах відбуваються дуже повільно, що спонукає до утилізації рослинних решток шляхом спалювання [29]. Тому в багатьох наукових роботах висвітлено результати біоконверсії соломи рису, яка характеризується дуже високим співвідношенням C:N (90:1), під час компостування курячого посліду [48; 52]. Крім того, застосування рисової соломи як наповнювача компостованої суміші дозволяє частково розв'язати питання з утворенням запахів, які досить добре поглинаються органічною речовиною [5].

Інтродукція спеціалізованих мікроорганізмів до компосту. Пташиний послід є поживним субстратом для багатьох груп мікроорганізмів. За даними Нодар зі співавт. [46], початкова чисельність мікроорганізмів у компості може становити 10^8 КУО/г сухої речовини. Зазвичай це специфічні представники мікросвіту, які потрапляють у відповідне середовище різними шляхами: типові мешканці шлунково-кишкового тракту птахів, які у певній кількості виділяються разом з екскрементами назовні, контактні

мікроорганізми з підстилки та твердих поверхонь для утримання птахів, робочого інвентаря та транспорту, який переміщує його на місце зберігання тощо. Також можливе використання мікроорганізмів для покращення якості підстилки, що використовується в утриманні птахів, як альтернативи хімічним дезінфікуючим засобам [57]. Відповідно, ці мікроорганізми у подальшому також потраплятимуть у компости.

Оскільки компостування — це процес біологічного окиснення органічної речовини, деполімеризації та перетворення органічних речовин, який здійснюється мікроорганізмами, то регулювання або вплив на видовий та кількісний склад угруповань мікробіоти є важливим. Набір мікроорганізмів на початку компостування має значення, адже склад мікробіоти та її чисельність на мезофільній стадії залежатиме саме від початкової її наявності. Також це прослідковується і на більш пізніх стадіях компостування — дозрівання та стабілізації [37; 46; 64]. Проте непрогнозованість перебігу процесів компостування за участі лише аборигенних представників мікробіоти змушує шукати альтернативні шляхи забезпечення субстратів необхідними мікроорганізмами.

Потужним прийомом, спрямованим на збільшення чисельності мікроорганізмів у компості, є інтродукція до компостованого субстрату спеціально селекціонованих бактерій та мікроміцетів, що зі свого боку зумовлює виділення великої кількості ферментів, які є одним із ключових факторів прискорення мінералізації й синтезу *de novo* органічної речовини [30; 55]. Важливо враховувати реакцію інтродукованих мікроорганізмів на проходження певних фаз компостування (насамперед, на термофільну фазу), оскільки успішність розвитку доданого до субстрату мікроорганізму значною мірою залежить від температури [2; 54].

Пошук ефективних мікроорганізмів з низкою агрономічно цінних властивостей проводять серед представників бактерій та мікроміцетів. Проте більшість досліджень все ж таки зосереджено на бактеріальних видах з огляду на їхнє швидке розмноження, вплив на трансформацію органічних речовин і стійкість до високих температур. Гриби ж цінуються за здатність синтезувати різноманітні позаклітинні ферменти для розкладання

біополімерів [23; 37]. Логічним видається провідна роль мікроміцетів у первинних процесах мінералізації таких стійких до мінералізації сполук як целюлоза та лігнін. Зі свого боку інтенсивний розвиток прокариотів у компостованих субстратах може зумовлюватися доступністю речовин, утворених грибами.

Мікроорганізми для інокуляції курячого посліду мають характеризуватися здатністю до швидкого розмноження, адже рівень конкуренції між інтродукованими та резидентними мікроорганізмами високий, зважаючи на значну чисельність останніх у компості. Тому найчастіше виділення ізолятів проводять саме з вихідної сировини, тобто компосту [45; 50].

В експерименті з компостування, проведеному групою китайських дослідників в Нанкінському університеті сільського господарства, порівнювали два різні способи інокуляції курячого посліду: 1) внесення мікробного інокулянту — *Ureibacillus terrenus* BE8 і *Bacillus tequilensis* BG7 (у співвідношенні 1:1); 2) внесення зрілого компосту (5 % до маси) [37]. Обидва способи інокуляції підвищували ефективність компостування проти необробленого варіанту, що свідчить про перспективність використання вже готового компосту як матеріалу для інокуляції.

Інший підхід до збагачення компостної суміші корисними мікроорганізмами для зменшення викидів NH_3 запропоновано Чжаном зі співавт. [68]. Він полягає у внесенні до компосту *Bacillus subtilis*, *B. stearothermophilus*, *Candida utilis*, іммобілізованих на біовугіллі з кукурудзяних стебел. На думку авторів, завдяки іммобілізації мікробних агентів на спеціальному матеріалі-носії вони можуть бути захищеними, адже уникатимуть прямого контакту з екстремальним середовищем і, відповідно, матимуть вищий рівень виживання.

Розв'язанню не менш важливої проблеми у процесі компостування курячого посліду — попередженню утворення неприємних запахів — присвячена робота Гутаровської зі співавт. [25]. Дослідники з польського Інституту технології ферментації і мікробіології для дезодорації пташиного посліду використовували *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii*, *Leuconostoc mesenteroides*, *Candida inconspicua* та *Psychrobacter faecalis*, які вносили ра-

зом з носієм — термопластичним водорозчинним полімером — полівініловим спиртом [25].

Для попередження виникнення під час компостування неприємного запаху, утворення якого зумовлене насамперед випаровуванням аміаку, Чжоу зі співавт. [73] запропонували здійснювати інокуляцію компостованої суміші групою мікроорганізмів — *Bacillus stearothermophilus*, *Candida utilis*, *B. subtilis*. Дослідники зробили припущення, що причина нижчих викидів аміаку полягала у перетворенні амонійного Нітрогену в нітратний за участі інтродукованих мікроорганізмів.

Розв'язання проблеми надлишкового утворення NH_3 , що є причиною появи неприємних запахів на виробництвах, можна також здійснювати через вплив на зміну мікробіому кишковика птахів пробіотичними препаратами [42].

Селвані зі співавт. [50] для скринінгу мікроорганізмів — агентів для інокуляції компосту на основі курячого посліду, виділили низку важливих метаболічних властивостей, якими вони мають володіти; це здатність до: розщеплення целюлози та кератину, окиснення аміаку, окиснення NO_2 (гетеротрофна нітрифікація), розчинення фосфатів, амоніфікації, синтезу уреаз та урикази. За цими ознаками дослідники виділили три види гетеротрофних мікроорганізмів роду *Bacillus* (*Bacillus flexus*, *B. cereus*, *B. subtilis*), які потенційно можуть бути використані як добавки під час компостування. Крім того, за допомогою чашкового методу виявлено їхню сумісність та зроблено висновок про послідовність їхньої дії та компенсаційні властивості. Тобто, йдеться про трофічний зв'язок між видами, коли розщеплення складних органічних сполук одним видом вивільняє речовини, які будуть використані як джерело живлення іншими.

На пізніх етапах компостування (фаза дозрівання) за даними Чжао зі співавт. [72], ефективним заходом є внесення до курячого компосту актинобактерій *Streptomyces* sp. і *Micromonospora* sp. Унаслідок цього спостерігалось встановлення симбіотичних взаємозв'язків інокулянтів з аборигенними актинобактеріями, посилювалися процеси деструкції целюлози та пришвидшувалися процеси компостування загалом, що також може бути пов'язано зі здатністю інокулянтів змі-

нювати поживний статус компостованої системи через вплив на резидентну мікробіоту. Важливою умовою, на думку дослідників, є правильне визначення часу біоаугментації, і для кожного інокулянта це буде свій оптимальний термін, який залежатиме від температурного діапазону, наявності мікробних метаболітів, ферментів та поживних речовин. Для цього необхідно відслідковувати кореляцію між періодом інокуляції та її ефективністю. Такі заходи дозволять значно покращити процес компостування [2].

У межах експерименту науковці для покращення процесу компостування курячого посліду використовували як інокулянт аміакоокиснювальні археї. Інформація про їх значне поширення у ґрунтах та водоймах і важливу роль в циклі Нітрогену дозволила зробити припущення про їх поширення і у курячому посліді, з високим вмістом органічного Нітрогену. Археї можуть бути важливими агентами нітрифікації, сприяючи зниженню газоподібних втрат Нітрогену у вигляді NH_3 та скорочуючи час компостування [66].

Аналізуючи дані табл. 1, можна зробити висновок, що переважання представників роду *Bacillus* серед списку інокулянтів пов'язане саме з їхнім кількісним домінуванням фактично на всіх фазах компостування і термофільній зокрема [35].

Інтродуковані у субстрат для компостування мікроорганізми чи їхні консорціуми здійснюють важливі процеси целюлолізу (розщеплення целюлози), кератинолізу (розщеплення фібрилярних білків складових пір'я та рамфотеки дзьоба птахів до амінокислот), окиснення аміаку та нітритів, солюбілізацію Фосфору тощо [50].

Пошук мікроорганізмів, які потенційно можуть бути використані як мікробні інокулянти до компостування, охоплює такі об'єкти, як курячий послід, рослинні рештки, харчові та тверді побутові відходи, компост, ризосферний ґрунт тощо [3; 20; 36; 72]. Зокрема, Ван зі співавт. для інокулювання компосту використовував штами, виділені з курячого посліду та кукурудзяної соломи [62].

Лі зі співавт. [36] для інокуляції компостованого матеріалу (курячий послід та подрібнені стебла кукурудзи) використовували мікробні інокулянти, попередньо отримані з мулу та побутових відходів. Унаслідок цього спостерігали підвищення ферментативної

Таблиця 1. Бактеріальні інокулянти для курячого компосту

Тип <i>Firmicutes</i>	Рід <i>Bacillus</i>	<i>B. amyloliquefaciens</i> , <i>B. coagulans</i> , <i>B. cereus</i> , <i>B. flexus</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. megaterium</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>B. tequilensis</i> , <i>B. stearothermophilus</i>	[37; 45; 50; 62; 67; 68]
	Рід <i>Lactobacillus</i>	<i>Lactobacillus</i> sp.	[52]
	Рід <i>Ureibacillus</i>	<i>U. thermosphaericus</i> , <i>U. terrenus</i>	[37; 62]
	Рід <i>Geobacillus</i>	<i>G. pallidus</i>	[62]
Тип <i>Pseudomonadota</i> (синонім <i>Proteobacteria</i>)	Рід <i>Paracoccus</i>	<i>P. denitrificans</i>	[62]
	Рід <i>Pseudomonas</i>	<i>P. fluorescens</i>	[32]
	Рід <i>Azotobacter</i>	<i>Azotobacter</i> sp., <i>A. chroococcum</i>	[32; 51]
Тип <i>Actinobacteria</i> (<i>Actinomycetota</i>)	Рід <i>Streptomyces</i>	<i>Streptomyces</i> sp., <i>S. globisporus</i>	[52; 72]
	Рід <i>Micromonospora</i>	<i>Micromonospora</i> sp.	[72]

активності (каталази, уреазы, целюлази) та скорочення терміну компостування. Але відсутність інформації про видовий склад мікроорганізмів-інокулянтів у цій роботі викликає низку запитань щодо безпечності введення у компост мікроорганізмів, серед яких потенційно можуть бути патогенні види.

Відомо, що серед мікроміцетів є багато представників, які проявляють високу ефективність у розщепленні карбонвмісних субстратів за рахунок синтезу низки важливих целюлозолітичних ферментів (карбоксилметилцелюлази, целобіази, ксиланази тощо) (табл. 2). Гаїнд зі співавт. [21] використову-

вали консорціум мезофільних грибів, який складався з активних лігнініноцелюлозолітичних видів: *Aspergillus awamori*, *A. nidulans*, *Trichoderma viride* та *Phanerochaete chrysosporium*, для інокуляції компостованих субстратів. За отриманими результатами не виявлено впливу консорціуму грибів на зниження співвідношення C:N, але водночас фіксували підвищення вмісту гумусу та фракцій гумінової кислоти, особливо у варіанті з компостування суміші, яка складалася з пшеничної соломи, курячого посліду, скошеної трави та інокулянта. За використання вищезазначених перспективних мікроміце-

Таблиця 2. Грибні інокулянти для курячого компосту

Відділ <i>Ascomycota</i>	Рід <i>Aspergillus</i>	<i>A. awamori</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. niger</i>	[21; 31; 48; 52]
	Рід <i>Trichoderma</i>	<i>T. viride</i> , <i>T. harzianum</i>	[2; 20; 21; 31; 48; 52]
	Рід <i>Candida</i>	<i>C. utilis</i> , <i>C. tropicalis</i>	[52; 68]
Відділ <i>Basidiomycota</i>	Рід <i>Phanerochaete</i>	<i>P. chrysosporium</i>	[21; 48; 52]

тів, але вже для інокуляції компостної суміші з курячого посліду та рисової соломи, дослідниками встановлено пришвидшення процесу компостування, підвищення активності целюлозолітичних та ксиланолітичних ферментів [48].

Сеуді [51] до компостної суміші (кур'ячий послід та стебла бавовнику) вносив інокулянт, що містив суспензію спор базидіоміцетового гриба *Phanerochaete chrysosporium* та культуру азотфіксувальної бактерії *Azotobacter chroococcum*. Інокуляцію компостних куп здійснювали після стадії активного розкладання органічної речовини та стабілізації температури компосту на рівні 30–35 °С (за 4 тижні від початку компостування). *P. chrysosporium*, як відомо [18; 60], належить до грибів білої гнилі, які широко використовуються в процесах біодеградації лігніну, що зумовлює цінність його застосування в процесах компостування. Ефективна дія *A. chroococcum* полягає у фіксації азоту та синтезі низки рiстстимульовальних речовин: амінокислот, органічних кислот, вітамінів та антимікробних речовин. Цей підхід забезпечив скорочення терміну компостування та отримання якісного агрономічно цінного продукту. Втім, на нашу думку, використання азотобактера як фіксатора атмосферного азоту у процесі компостування кур'ячого посліду не дозволить реалізувати цю функцію через високий вміст Нітрогену в субстраті.

В роботі Гаїнд зі співавт. [21] повідомляється про використання *Trichoderma harzianum* ITCC 6721, попередньо виділеного з компосту. Штам характеризується здатністю продукувати в комплексі з іншими мікроміцетами достатньої кількості ферментів целюлази та фітази у технології компостування суміші кур'ячого посліду, гною ВРХ та рисової соломи.

Внесення до кур'ячого посліду асоціації *T. harzianum* 128 сприяло скороченню термінів компостування та збереженню важливих елементів живлення. За висновками авторів, інокулянт сприяє інтенсифікації процесів мінералізації, проліферації целюлозолітичних мікроорганізмів та продуцентів фізіологічно активних сполук [2–4].

Для прискорення процесу компостування Каусар зі співавт. [31] як мікробні інокулянти використовували *Aspergillus niger* (F44) та *Trichoderma viride* (F26), які попере-

дньо було відібрано на основі їхньої оптимальної лігно- та целюлозолітичної здатності у процесі розкладання рисової соломи. Трансформація лігніну, як вірогідної основної фракції в синтезі гумусу, має складний хімічний шлях, що охоплює реакції деградації та конденсації. Тому потенційний синтез гумусових сполук у компості цікавить багатьох дослідників, і використання як інокулянтів мікроорганізмів, здатних до деструкції лігніну, підвищує рівень значущості компосту як органічного добрива, що сприятиме підвищенню родючості ґрунту.

Про можливість використання ЕМ-препаратів (ефективні мікроорганізми) під час компостування кур'ячого посліду повідомляється у низці робіт [52; 58; 62]. Серед можливих переваг вказано здатність до синтезу різних ферментів, що можуть розщеплювати складні структуровані молекули з утворенням водорозчинних сполук, що пришвидшує деградацію вихідної сировини. Але серед недоліків чи просто особливостей застосування вказано кращу ефективність ЕМ-технології у компостуванні субстратів повільного розкладання, відходів з високим співвідношенням С/Н (деревина, солома, різна рослинність), трави та жирів.

Мікроорганізми, які входять до складу ЕМ, представлені великою групою фотосинтетичних та молочнокислих бактерій, дріжджами, актиноміцетами та грибами. Як стверджують автори, зазначені вище мікроорганізми можуть забезпечувати широкий спектр корисних ефектів, а саме: фіксацію атмосферного азоту, розкладання органічної речовини, пригнічення патогенів, трансформацію та збільшення доступності поживних речовин для рослин, детоксикацію пестицидів, синтез антибіотиків та інших біологічно активних речовин, утворення простих органічних молекул, утворення комплексів важких металів, синтез полісахаридів, які покращують агрегацію ґрунту. Загалом вважається, що суміш ефективних мікроорганізмів має стабілізуювальний вплив через розкладання і перетворення органічної речовини, а також обмеження розвитку патогенів. До того ж додавання ЕМ безпосередньо до компостованого субстрату спрямоване на створення популяції корисних мікроорганізмів, запобігаючи розмноженню інших видів. Але достеменно-го пояснення механізму їх дії не наводиться,

це лише припущення [26], що є цілком зрозумілим, зважаючи на широкий спектр заявлених мікроорганізмів. До того ж, за оцінки ефективності ЕМ-мікроорганізмів для компостування слід враховувати і можливість їх непрогнозованого співвідношення за зміни умов існування.

Шарма зі співавтор. [52] порівнювали ефективність біоаугментації рисової соломи та курячого посліду двома типами інокулянтів та їх комбінованою дією. До складу першого інокулянту входили *Aspergillus nidulans*, *A. awamori*, *Trichoderma viride*, *Phanerochaete chrysosporium*, попередньо протестовані на сумісність та здатність до синтезу лігноцелюлозолітичних ферментів, інший інокулянт був представлений консорціумом мікроорганізмів *Candida tropicalis*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Streptomyces globisporus*, *Lactobacillus* sp. з високим потенціалом продукування гідролітичних ферментів. Кращий результат за швидкістю процесу компостування авторами відзначено за комбінованою дією двох типів інокулянтів.

Для обґрунтування важливості внесення інокулянтів у компостовану суміш варто звернути увагу на результати оцінки мікробних угруповань, які метаболізують Нітроген та представлені у роботі Сельвамана зі співавтор. [50]. За умови внесення консорціуму мікроорганізмів спостерігалось незначне зниження чисельності амоніфікаторів на фоні показників компостних сумішей, куди не вносили мікроорганізми, водночас знижувалася чисельність продуцентів уреаз (яка розщеплює сечовину до аміаку та вуглекислого газу), натомість фактично вдвічі збільшувалася чисельність мікроорганізмів, які окиснюють амоній, та у вісім разів — кількість представників групи нітритокиснювальних мікроорганізмів. Співвідношення між цими групами теж змінилося, збільшилася кількість нітритокиснювальних представників у 3,5 рази проти окиснювачів амонію, що надалі сприяло збільшенню вмісту нітратного Нітрогену. Ці зміни є важливими, оскільки збільшення чисельності популяцій окиснювачів аміаку убезпечує від втрат Нітрогену у вигляді NH_3 , а розвиток окиснювачів нітритів забезпечує збереження Нітрогену у вигляді нітрату, що є основною формою, у якій нітроген поглинається рослинами. Водночас варто мати на увазі, що нітрати є субстратом

для розвитку денітрифікувальних мікроорганізмів, тож найкращою формою зберігання Нітрогену в компості є органічна. Щоб гарантовано забезпечити таку трансформацію, у субстраті треба мати доступний Карбон. Саме такі умови створюються за оптимального співвідношення C/N у компості.

Поряд із численними публікаціями, що свідчать про успішність застосування інокулянтів у компостуванні курячого посліду, є повідомлення, що внесення мікроорганізмів не завжди забезпечує очікувані ефекти. Так, повідомляється, що інокуляція не сприяла скороченню часу компостування, але водночас спостерігалось підвищення температури, прискорення деградації органічної речовини та підвищення індексу схожості (проростання) насіння рослин [35]. Для пояснення цього ефекту необхідно досліджувати механізми дії інокулянтів на процеси перетворення органічних речовин у компості.

Особливості процесу компостування курячого посліду. Компостування може здійснюватися у відкритих купах, біореакторах, ферментерах, а на етапі досліджень — у спеціальних ємностях. Застосування біореакторів для компостування має низку переваг, але одним із факторів, що перешкоджає реалізації його у великих масштабах, є невеликий об'єм.

Компостні купи потребують обов'язкового перемішування з певною періодичністю (щонайменше один раз на тиждень) задля запобігання розвитку анаеробних процесів та викидів CH_4 та N_2O [39; 53]. Безперечно, зміна фізичних параметрів (рН, температури, вологості, електричної провідності тощо) та хімічних (розкладання складних сполук на простіші та виділення газоподібних сполук CO_2 , CH_4 , NH_3 , N_2O) супроводжується і зміною (сукцесією) угруповань мікроорганізмів, чисельність одних буде зменшуватися, а інших — навпаки, зростати [12].

Процес компостування супроводжується зміною фізико-хімічних параметрів компостованого субстрату — значеннями температури, вмісту вологи, рН, карбон- та нітрогенвмісних компонентів, змін хімічного споживання кисню, легких речовин, ступенем зрілості органічної речовини у компості [62]. Неодмінною складовою є систематичне відстежування цих параметрів для розуміння ефективності інокуляції мікроорганізмів та

процесу компостування.

Зважаючи на потенційну наявність у компостованих сумішах на основі курячого посліду насіння бур'янів та патогенних мікроорганізмів, температура компостованого субстрату та тривалість термічної стадії є визначальними для якісних показників готового компосту.

Досліджуючи розвиток та вплив інтродукованих у компост мікроорганізмів, науковці спостерігають зміни температурного показника [62]. Так, інокуляція мікроорганізмів подовжила термофільну стадію (фазу) на декілька днів, а температурний максимум сягав 68,4 °С, що було зумовлено зростанням мікробної активності. Відзначено, що чутливість мікроорганізмів до нестачі вологи і температури різниться, причому більш чутливими до зміни цих факторів, як порівняти з бактеріями, є мікроміцети.

Ще один параметр, що динамічно змінюється під час компостування, — рівень вмісту вологи. Випаровування води відбувається протягом усього періоду компостування. Зростання чисельності мікроорганізмів у субстраті сприяє зменшенню вмісту вологи. Ці спостереження опубліковано в роботі Вана зі співавторів. [62].

Інтенсивний перебіг різноманітних хімічних реакцій у компостних купках безпосередньо впливає на зміну кислотності у сумішах. Зокрема, перетворення нітрогенвмісних сполук, що супроводжується вивільненням та поступовим накопиченням аміаку, зумовлювало підвищення рН. Більшою мірою такі зміни були помітні у компостних купках, інокульованих корисними мікроорганізмами. Їхня підвищена ферментативна активність сприяла як підвищенню температури, так і зростанню рН у середовищі [62]. Хоча значення рН не має критично важливого впливу на процес компостування, все ж таки його відслідковують у динаміці задля попередження надмірного потрапляння NH_3 в атмосферу, що підвищується за високого значення рН ($> 7,5$) [8].

Важливою умовою біокомпостування курячого посліду є забезпечення аеробних умов у всій товщі компостних буртів. Якщо для компостування використовуються спеціальні біореактори, то кисень подається автоматично, разом із перемішуванням. В іншому випадку важливо з певною періодичністю

проводити перевертання компостних куп. Для покращення пористості компостної маси практикують внесення додаткових, переважно мінеральних, субстратів. Авасті зі співавторів. [6] експериментували з внесенням глини у різній кількості і спостерігали позитивну динаміку збільшення видового різноманіття мікроорганізмів (зокрема аеробних ендоспороутворювальних бактерій роду *Bacillus*) під час компостування, хоча загальна чисельність мікроорганізмів суттєво не змінювалася.

Про зміну вмісту розчинних солей під час компостування свідчить зміна електропровідності. Вона цілком прогнозовано зростає на початку компостування, коли концентрація мінеральних солей збільшується за рахунок мінералізації органічної речовини. Далі з перетворенням Нітрогену, а саме з його переходом в амоній, електрична провідність зменшується. Цей параметр чітко відслідковується за інтродукції до компостованої маси мікроорганізмів [62].

Широко розповсюджено тест на фітотоксичний (або фітоінгібіторний) вплив, що визначається за параметрами проростання насіння та відображає ступінь солоності компосту (концентрацію водорозчинних солей). Цей параметр також є важливим маркером зрілості компосту [52].

У процесі компостування відбувається sukcesія філогенетичних груп бактерій, що детально описано у відповідних наукових роботах [6; 15; 46]. Водночас Аткинсон зі співавторів. [5] методом флуоресцентної мікроскопії з 4,6-діамідіно-2-феніліндолом (DAPI) та за аналізом рівня аденозинтрифосфату встановили, що чисельність мікроорганізмів у процесі компостування суттєво не змінюється.

SUCCESSIA мікроорганізмів під час компостування пов'язана з наявністю у компостованій суміші одночасно сполук, що легко розкладаються, та більш складних полімерів. Лопес-Гонсалес зі співавторів. [38] виділили 4000 мікроорганізмів з компостної маси, описали їхню ферментативну активність та ідентифікували. Більшість ізолятів проявляли ферментативну активність у розкладанні полімерних сполук до більш простих речовин, доступних для мікробіоти компосту. На думку авторів, визначальна роль у компостуванні належить резидентній мікробіоті.

Про послідовну зміну еколого-трофічних груп мікроорганізмів у складі угруповань під час компостування повідомляють також Данон зі співавт. [15]. За результатами молекулярного аналізу динаміки мікробного різноманіття компосту ними встановлено, що найпоширенішим на всіх фазах компостування є тип *Proteobacteria*, представники якого характеризуються великою фізіологічною та морфологічною різноманітністю.

Дослідження, проведені Де Ганес зі співавт. [16], дозволили спростувати припущення про перехід мікроорганізмів з мезофільної фази у фазу дозрівання компосту, перебуваючи під час фази високих температур у стані спокою. На їхню думку, повторної колонізації не відбувається, адже за результатами аналізу піросеквенування, склад мікробних угруповань під час мезофільної фази і фази дозрівання відрізнявся.

Найчастіше в наукових роботах згадується про переважання чотирьох типів бактерій — *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, які відіграють провідну роль у мінералізації органічної речовини, колообігу Сульфуру, Нітрогену та Карбону [6]. Доведено, що перераховані типи є доміантними у складі мікробіоти компосту. Зокрема, встановлено, що у курячому компості чисельність представників типу *Firmicutes* становила 68 % від загальної кількості бактерій [71]. Вони є типовим мешканцями мікробіоти кишківника курей [19], і це дозволяє зробити припущення про природу поширення *Firmicutes* у курячому посліді.

У компості на основі курячого посліду переважають типи бактерій, що є представниками *Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, а серед грибів — *Ascomycota* (як на початкових, так і на кінцевих стадіях компостування) [23; 61]. На видовому рівні опис популяцій мікроорганізмів складніший. Крім того, Ван зі співавт. [61] встановили позитивну кореляцію між складом мікробного угруповання і фізико-хімічними параметрами компосту, що є цілком логічним, але потребує подальшого вивчення цих зв'язків. Цікаво прослідкувати і такі причинно-наслідкові зв'язки: зміна раціону тварин викликає зміни у мікробіоті шлунково-кишкового тракту, що, імовірно, впливає на видовий склад мікроорганізмів у екскрементах, а отже, і у компостах на їхній основі.

Результати впливу різних наповнювачів компостних сумішей на зміну угруповань мікробіоти курячого посліду висвітлено в роботі Чжана зі співавт. [71]. Проте розкриття механізму(-ів) селективного впливу карбонвмісних наповнювачів на чисельність і видовий склад мікроорганізмів у компості залишається актуальним.

У курячому посліді переважає тип мікроорганізмів *Firmicutes*, відомих своєю здатністю утворювати ендоспори, на противагу гною ВРХ, в якому на початку компостування переважали протеобактерії — це фенотипово та метаболічно найбільш різноманітна філогенетична лінія, представники якої відіграють вирішальну роль у глобальних циклах Карбону, Нітрогену й Сульфуру [34].

Гриби *Ascomycota* присутні на всіх стадіях компостування субстрату на основі курячого посліду, що можна пояснити потужним ферментативним апаратом представників цього типу. Руйнуючи органічний матеріал у компості, вони здатні забезпечити себе поживними речовинами та необхідною енергією. Крім того, імовірна наявність у компості антибіотиків також може мати селективний вплив на мікроміцети. Зокрема, види роду *Aspergillus*, відомі здатністю проявляти резистентність до антибіотиків, можуть цілком домінувати у курячому компості [69].

Зміна складу мікроорганізмів під час компостування також пов'язана з наявністю водорозчинного Карбону, амонію, нітратів. Склад мікроміцетів більшою мірою пов'язують з температурою компостної маси та вмістом вологи у ній [69].

Фактично неможливо дати точний узагальнений опис видового різноманіття мікроорганізмів у курячому посліді, які визначають напрями перетворення речовин у компості. Це, як ми вже зазначили вище, залежить від багатьох факторів, особливо від способу утримання курей та їхнього раціону. Проте в тій чи іншій кількості у посліді можуть бути представлені: ацидофільні мікроорганізми, аеробні спороутворювальні бактерії, актиноміцети, мікроміцети, протеолітичні та амоніфікувальні мікроорганізми, окиснювачі амонію і нітритів, денітрифікатори, аеробні та анаеробні целюлозолітики, амілолітики, пектинолітики, сульфатвідновлювальні мікроорганізми тощо [46].

Про зрілість компосту свідчать декілька важливих біохімічних та мікробіологічних показників: відсутність підвищення температури після перевертання субстрату, підвищення індексу схожості насіння за біотестування компосту [63]. Також про задовільне дозрівання компосту свідчить співвідношення між C/N, менше за 12:1 [62]. Варто звернути увагу на те, що початкове співвідношення C/N має теж визначальне значення на склад мікробіоти компостованої суміші, оскільки переважають певних сполук супроводжується домінуванням відповідного набору мікроорганізмів (представників сахаролітичного або протеолітичного шляхів деградації органічної речовини). Сукцесія мікроорганізмів є важливим маркером ефективності процесу компостування. Моніторинг чисельності та видового складу мікроорганізмів у компості є ефективним для управління цим процесом, поява певних видів мікроорганізмів може відображати якість дозрівання компосту.

Щодо Нітрогену, то на початкових етапах компостування його вміст у вигляді амонію NH_4^+ зростає (адже мікроорганізми сприяють перетворенню органічного Нітрогену в амонійний), а далі зі зниженням температури (наприкінці компостування) його вміст зменшується унаслідок перетворення в нітратну форму. Це пояснюється температурним оптимумом для розвитку нітрифікуювальних мікроорганізмів — нижче за 40°C [62]. Вміст нітратів під час компостування потребує моніторингу, що пов'язано з їхнім впливом на зміну параметрів середовища (компосту) та розвиток мікроорганізмів [54].

Загальні втрати Нітрогену під час компостування органічних відходів значні і за деякими оцінками можуть становити від 40 % до 80 % [44]. Для зменшення випаровування аміаку під час компостування Нахшінієв зі співавт. [44] запропонували метод, який передбачає додавання гідротермічно обробленої лігноцелюлози (180°C , 1,0 МПа, 30 хв.). Ефективність цього методу пояснюється наявністю в обробленій лігноцелюлозі великої кількості цукрів, що активізує розвиток мікроорганізмів, які зі свого боку іммобілізують Нітроген, утворений за інтенсивного розпаду органічних нітрогенвмісних сполук. Внаслідок цього мінімізуються втрати Нітрогену у складі газоподібних сполук (зокрема NH_3).

Метод гіпертермофільного компостування, розроблений японськими вченими з Інституту екологічної мікробіології та Токійського університету фармації та наук про життя [47], базується на іншому принципі — укладанні великих куп з подальшим їх розігрівом до температури понад 80°C . Пен Цуй зі співавт. [14], застосовуючи цей метод у своїй роботі, виявили зниження активності амоніфікаторів та інгібування активності ферментів протеази і уреази високими температурами в компостній суміші. Втрати Нітрогену знизилися на 40,9 % та пришвидшився синтез стійких гумінових речовин, що свідчить про утримання важливого органогенного елемента N у компостній системі. Подібні результати нещодавно отримано й опубліковано Хуаном зі співавт. [27]. Гіпертермофільний спосіб обробки компосту дозволив зменшити втрати NH_3 шляхом інгібування протеолітичних бактерій і активності протеази відповідно.

Втрати Нітрогену через випаровування аміаку можливо мінімізувати шляхом вибору оптимального й ефективного карбонвмісного наповнювача та адсорбента. За результатами досліджень Махімайраджа зі співавт. [40], пшенична солома та торф як наповнювачі та цеоліт у якості адсорбенту забезпечили суттєве зниження втрат NH_3 .

Оскільки компостування є біоокиснювальним процесом, що здійснюється мікроорганізмами, то фізико-хімічні параметри у компості (щільність, пористість, вміст поживних речовин, режим аерації, температура, вологість, значення рН тощо) мають бути сприятливими для розвитку цих мікроорганізмів. Процеси ферментації органічної речовини, супроводжуються накопиченням речовин, які є попередниками гумусових сполук (поліфеноли, амінокислоти, відновлювальні цукри, білки тощо) та поступовим зниженням чисельності амоніфікуювальних мікроорганізмів, мікроміцетів та представників інших груп, відповідальних за мінералізацію органічних сполук. Наступний важливий етап компостування — гуміфікація. Він пов'язаний з діяльністю мікроорганізмів і відбувається за рахунок реакцій полімеризації та інших складних біохімічних процесів [11]. Вплив та механізм дії різних наповнювачів та інокулянтів на процеси гуміфікації компосту є малодослідженими.

Висновки

Обґрунтовуючи роль мікроорганізмів у процесі компостування, варто зазначити, що вони є рушійною силою, яка запускає та регулює цей процес. Використовуючи органічні речовини як джерело поживних елементів та енергії, мікроорганізми трансформують їх, розкладаючи до простіших сполук, що сприяє прискоренню процесу компостування та покращує якість кінцевого продукту. Застосування біологічно активних компонентів — мікроорганізмів — позитивно впливає на низку важливих процесів під час компостування. Процес компостування може відбуватися і без додавання інокулянтів, але варто зауважити, що це займає більше часу і може супроводжуватися проліферацією потенційно шкідливих бактерій.

Курячий послід у процесі компостування можна перетворити у субстрат, збагачений органічними Карбоном, Нітрогеном та іншими поживними речовинами. Цей процес трансформації є можливим завдяки діяльності мікробіоти — як бактерій, так і грибів, оскільки кожна з цих груп мікроорганізмів має своє функціональне призначення.

Зважаючи на наявність різних джерел Карбону залежно від країни, специфікації господарства тощо, варто не обмежувати компостування курячого посліду лише додаванням соломи чи рослинних решток кукурудзи. Маємо орієнтуватися і розробляти методики та рекомендації, які б не обтяжували господарників пошуками певного карбонвмісного субстрату, а давали змогу використати те, що є в наявності. Це допоможе розв'язати не лише питання економії грошових чи енергетичних ресурсів, а й екологічні питання (як от утилізація целюлозовмісних субстратів — опалого листя, скошеної трави тощо), на які витрачаються час, простір, інші ресурси, а неправильна утилізація відходів шкодить довкіллю (під час спалювання, перегнивання за анаеробних умов тощо).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Виробництво та використання органічних добрив: монографія / Шувар І. А. та ін.; за заг. ред. І. А. Шуvara. Івано-Франківськ : Симфоніяфорте, 2015. 596 с.
2. Волкогон В. В., Деркач С. М., Дімова С. Б., Мягка М. В., Луценко Н. В., Штанько Н. П., Наконечна Л. Т. Біокомпостування органічного субстрату на основі пташиного посліду за інтро-

дукції асоціації грибів *Trichoderma harzianum* 128. *Агроекологічний журнал*. 2018. № 1. С. 108–114.

3. Волкогон В. В., Мягка М. В., Дімова С. Б., Деркач С. М., Пиріг О. В., Луценко Н. В. Вплив інтродукції целюлозолітичних мікроорганізмів на мікробоценоз в умовах компостування курячого посліду. *Вісник аграрної науки*. 2019. Т. 97. № 5 (794). С. 53–64. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201905-07>

4. Деркач С. М., Волкогон В. В., Наконечна Л. Т., Луценко Н. В., Штанько Н. П. Розвиток *Trichoderma harzianum* 128 на різних етапах компостування курячого посліду. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2015. Вип. 21. С. 3–6. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.21.3-6>

5. Atkinson C. F., Jones D. D., Gauthier J. J. Biodegradability and Microbial Activities During Composting of Poultry Litter. *Poultry Science*. 1996. Vol. 75. P. 608–617.

6. Awasthi M. K., Chen H., Wang Q., Liu T., Duan Y., Awasthi S. K., Ren X., Tu Z., Li J., Zhao J., Zhang Z. Succession of bacteria diversity in the poultry manure composted mixed with clay: Studies upon its dynamics and associations with physicochemical and gaseous parameters. *Biore-source Technology*. 2018. Vol. 267. P. 618–625. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.094>

7. Barrington S., Choiniere D., Trigui M., Knight W. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses. *Biore-source Technology*. 2002. Vol. 83. P. 189–194.

8. Bernal M. P., Alburquerque J. A., Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Biore-source Technology*. 2009. Vol. 100. P. 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>

9. Cao Y., Huang H., Qian Y., Wang L., Xu Y., Jin H. ... Chang Z. Hyperthermophilic pretreatment device and its application on improving decomposition effect for chicken manure and rice straw aerobic composting. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 33(13). P. 243–250. <http://dx.doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.032>

10. Chang R., Li Y., Chen Q., Gong X., Qi Z. Effects of carbon-based additives and ventilation rate on nitrogen loss and microbial community during chicken manure composting. *PLoS ONE*. 2020. Vol. 15(9): e0229880. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229880>

11. Chen L., Chen Y., Li Y., Liu Y., Jiang H., Li H. ... Zou B. Improving the humification by additives during composting: A review. *Waste Management*. 2023. Vol. 158. P. 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.040>

12. Chen Z., Jiang X. Microbiological Safety of Chicken Litter or Chicken Litter-Based Organic Fer-

- tilizers: A Review. *Agriculture*. 2014. Vol. 4. P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/agriculture4010001>
13. Colueke C. G. A Critical Evaluation of Inoculum in Composting. *Appl. Microbiol.* 1954. Vol. 2. P. 45–33.
 14. Cui P., Liao H., Bai Y., Li X., Zhao Q., Chen Z. ... Zhou S. Hyperthermophilic composting reduces nitrogen loss via inhibiting ammonifiers and enhancing nitrogenous humic substance formation. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 692. P. 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.239>
 15. Danon M., Franke-Whittle I. H., Insam H., Chen Y., Hadar Y. Molecular analysis of bacterial community succession during prolonged compost curing. *FEMS Microbiol Ecol.* 2008. Vol. 65. P. 133–144. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00506.x>
 16. De Gannes V., Eudoxie G., Hickey W. J. Prokaryotic successions and diversity in composts as revealed by 454-pyrosequencing. *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 133. P. 573–580. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.138>
 17. Faure D., Deschamps A. M. The Effect of Bacterial Inoculation On The Initiation Of Composting Of Grape Pulps. *Bioresource Technology*. 1991. Vol. 37. P. 235–238.
 18. Feng C., Zeng G., Huang D., Hu S., Zhao M., Lai C. ... Li N. Effect of ligninolytic enzymes on lignin degradation and carbon utilization during lignocellulosic waste composting. *Process Biochemistry*. 2011. Vol. 46(7). P. 1515–1520. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2011.01.038>
 19. Ferrario C., Alessandri G., Mancabelli L., Gering E., Mangifesta M., Milani C. ... Ventura M. Untangling the cecal microbiota of feral chickens by culturomic and metagenomic analyses. *Environ Microbiol.* 2017. Vol. 19(11). P.4771–4783. <http://dx.doi.org/10.1111/1462-2920.13943>
 20. Gaid S. Effect of fungal consortium and animal manure amendments on phosphorus fractions of paddy-straw compost. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2014. Vol. 94. P. 90–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.023>
 21. Gaid S., Nain L., Patel V. B. Quality evaluation of co-composted wheat straw, poultry droppings and oil seed cakes. *Biodegradation*. 2009. Vol. 20. P. 307–317. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9223-1>
 22. Gao M., Liang F., Yu A., Li B., Yang L. Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. *Chemosphere*. 2010. Vol. 78. Issue 5. P. 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.10.056>
 23. Gu W., Lu Y., Tan Z., Xu P., Xie K., Li X., Sun L. Fungi diversity from different depths and times in chicken manure waste static aerobic composting. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 239. P. 447–453. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.047>
 24. Guerra-Rodríguez E., Vazquez M., Dóaz-Ravi M. Co-composting of barley wastes and solid poultry manure. *Bioresource Technology*. 2000. Vol. 75. P. 223–225.
 25. Gutarowska B., Matusiak K., Borowski S., Rajkowska A., Brycki B. Removal of odorous compounds from poultry manure by microorganisms on perlite–bentonite carrier. *J. Environ. Manage.* 2014. Vol. 141. P. 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.017>
 26. Hidalgo D., Corona F., Martin-Marroguin J. M. Manure biostabilization by effective microorganisms as a way to improve its agronomic value. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022. Vol. 12. P. 4649–4664. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02428-x>
 27. Huang Y., Chen Y., Huang H., Shah M. G., Lin J., Yan M. ... Xiao X. Hyperthermophilic pretreatment composting can reduce ammonia emissions by controlling proteolytic bacterial community and the physicochemical properties. *Bioresources and Bioprocessing*. 2023. № 10:37. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00659-y>
 28. Iyappan P., Karthikeyan S., Sekar S. Changes in the composition of poultry farm excreta (PFE) by the cumulative influence of the age of birds, feed and climatic conditions and a simple mean for minimizing the environmental hazard. *International Journal of Environmental Sciences*. 2011. Vol. 1, № 5. P. 847–859.
 29. Juliano B. O. Rice hull and rice straw. In: *Chemistry and Technology*, 2nd edn. American Association of Cereal Chemists, Minnesota. 1985. P. 689–755.
 30. Junqiu W., Zhao Y., Zhao W., Yang T., Zhang X., Xie X. ... Wei Z., Effect of precursors combined with bacteria communities on the formation of humic substances during different materials composting. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 226. P. 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.031>
 31. Kausar H., Ismail M. R., Saud H. M., Othman R., Habib S. Use of Lignocellulolytic Microbial Consortium and pH Amendment on Composting Efficacy of Rice Straw. *Compost Science & Utilization*. 2013. Vol. 21. P. 121–133. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2013.842131>
 32. Kavitha R., Subramanin P. Bioactive Compost — A Value Added Compost with Microbial Inoculants and Organic Additives. *Journal of Applied Sciences*. 2007. Vol. 7(17). P. 2514–2518.
 33. Kelleher B. P., Leahy J. J., Henihan A. M., O'Dwyer T. F., Sutton D., Leahy M. J. Advances in poultry litter disposal technology — a review. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83. P. 27–36.

34. Kersters K., De Vos P., Gillis M., Swings J., Vandamme P., Stackebrandt E. Introduction to the Proteobacteria. M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer, E. Stackebrandt (Eds.). *The Prokaryotes*. New York : Springer, 2006. P. 3–37. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.004>
35. Li J., Wang X., Cong C., Wan L., Xu Y., Li X. ... Wang L. Inoculation of cattle manure with microbial agents increases efficiency and promotes maturity in composting. *3 Biotech*. 2020. Vol. 10. 128. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-2127-4>
36. Li S., Li J., Yuan J., Li G., Zang B., Li Y. The influences of inoculants from municipal sludge and solid waste on compost stability, maturity and enzyme activities during chicken manure composting. *Environmental Technology*. 2017. Vol. 38 (13-14). P. 1770–1778. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1291755>
37. Liu H., Huang Y., Duan W., Qiao C., Shen Q., Li R. Microbial community composition turnover and function in the mesophilic phase predetermine chicken manure composting efficiency. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 313. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123658>
38. López-González J. A., Suárez-Estrella F., Vargas-García M. C., López M. J., Jurado M. M., Moreno J. Dynamics of bacterial microbiota during lignocellulosic waste composting: Studies upon its structure, functionality and biodiversity. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 175. P. 406–416. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.123>
39. Ma R., Liu Y., Wang J., Li D., Qi C., Li G., Yuan J. Effects of oxygen levels on maturity, humification, and odor emissions during chicken manure composting. *J. Clean. Prod.* 2022. Vol. 369. 133326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133326>
40. Mahimairaja S., Bolan N. S., Hedley M. J., Macgregor A. N. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: An incubation experiment. *Bioresource Technology*. 1994. Vol. 47, Is. 3. P. 265–273. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90190-2](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90190-2)
41. Martin A. M., Evans J., Portger D., Patel T. R. Comparative effects of peat and sawdust employed as bulking agents in composting. *Biore-sour. Technol.* 1993. Vol. 44. P. 65–69.
42. Mi J., Chen X., Liao X. Screening of single or combined administration of 9 probiotics to reduce ammonia emissions from laying hens. *Poultry Science*. 2019. Vol. 98, Is. 9. P. 3977–3988. <https://doi.org/10.3382/ps/pez138>
43. Motte J.-C., Watteau F., Escudié R., Steyer J.-P., Bernet N., Delgenes J.-P., Dumas C. Dynamic observation of the biodegradation of lignocellulosic tissue under solid-state anaerobic conditions. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 191. P. 322–326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.130>
44. Nakhshiniev B., Perera C., Biddinika M. K., Gonzales H. B., Sumida H., Yoshikawa K. Reducing ammonia volatilization during composting of organic waste through addition of hydrothermally treated lignocellulose. *Int. Biodeterior. Biodegradation*. 2014. Vol. 96. P. 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.08.011>
45. Nauanova A., Yerpasheva D., Shakhbayeva G., Yermekov A., Baimbetova E. Identification and screening of microorganisms common in poultry manure. *Sys. Rev. Pharm.* 2020. Vol. 11, Is. 12. P. 1582–1588.
46. Nodar R., Acea M. J., Carballas T. Microbial Populations of Poultry Pine-Sawdust Litter. *Biological Wastes*. 1990. Vol. 33. P. 295–306.
47. Oshima T., Moriya T. Preliminary Analysis of Microbial and Biochemical Properties of High-Temperature Compost. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2008. Vol. 1125. P. 338–344. <https://doi.org/10.1196/annals.1419.012>
48. Pandey A. K., Gaiind S., Ali A., Nain L. Effect of bioaugmentation and nitrogen supplementation on composting of paddy straw. *Biodegradation*. 2009. Vol. 20. P. 293–306. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9221-3>
49. Romero-Yam L. A., Almaraz-Suárez J. J., Velasco-Velasco J., Galvis-Spinola A., Gavi-Reyes F. Microbial dynamics during composting of filter cake reactivated with chicken manure. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 2015. Vol. 21(1). P. 21–31. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.09.032>
50. Selvamani K., Annadurai V., Soundarapandian S. Improved co-composting of poultry manure with complementary consortium of indigenous *Bacillus* spp. *Biotech*. 2019. Vol. 9. 215. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1745-1>
51. Seoudi O. Enhancement of Cotton Stalks Composting with Certain Microbial Inoculations. *Journal of Advanced Laboratory Research in Biology*. 2013. Vol. 4, Is. 1. P. 26–35
52. Sharma A., Sharma R., Arora A., Shah R., Singh A., Pranaw K., Nain L. Insights into rapid composting of paddy straw augmented with efficient microorganism consortium. *Int J Recycl Org Waste Agricult.* 2014. Vol. 3. 54. <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0054-2>
53. Shen Y., Ren L., Li G., Chen T., Guo R. Influence of aeration on CH₄, N₂O and NH₃ emissions during aerobic composting of a chicken manure and high C/N waste mixture. *Waste Management*. 2011. Vol. 31 P. 33–38 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.019>
54. Shi M., Wei Z., Wang L., Wu J., Zhang D., Wei D. ... Zhao Y. Response of humic acid formation to elevated nitrate during chicken manure composting. *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 258. P. 390–394. <https://doi.org/10.1016/j.bior tech.2018.03.056>

55. Tan K. H. Humic matter in soil and the environment: principles and controversies. Boca Raton: CRC Press. 2014. 495 p.
56. Tiquia S. M., Wan H. C., Tam N. F. Y. Microbial Population Dynamics and Enzyme Activities During Composting. *Compost Science & Utilization*. 2002. Vol. 10(2). P. 150–161. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702075>
57. United States Patent. Biological poultry litter treatment composition and its use. Thomas G. Rehberger, Wauwatosa, WS. Patent Number: 5,945,333. Date of Patent: Aug. 31, 1999.
58. Uribe J. F., Estrada M. M., Córdoba S. Evaluación de los microorganismos eficaces (EM) en producción de abono orgánico a partir del estiércol de aves de jaula. *Rev Colomb Cienc Pecu*. 2001. Vol. 14(2). P. 164–172.
59. Vargas-García M. C., López M. J., Suárez F., Moreno J. Laboratory study of inocula production for composting processes. *Bioresource Technology*. 2005. Vol. 96. P. 797–803.
60. Vargas-García M. C., Suárez-Estrella F., López M. J., Moreno J. Effect of inoculation in composting processes: modifications in lignocellulosic fraction. *Waste Management*. 2007. Vol. 27. P. 1099–1107.
61. Wan J., Wang X., Yang T., Wei Z., Banejee S., Friman V.-P. ... Shen Q. Livestock Manure Type Affects Microbial Community Composition and Assembly During Composting. *Front. Microbiol*. 2021. Vol. 12. 621126. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.621126>
62. Wan L., Wang X., Cong C., Li J., Xu Y., Li X. ... Wang L. Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 301. 122730. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122730>
63. Wang G., Kong Y., Yang Y., Ma R., Shen Y., Li G., Yuan J. Superphosphate, biochar, and a microbial inoculum regulate phytotoxicity and humification during chicken manure composting. *Sci Total Environ*. 2022. Vol. 10(824). 153958. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153958>
64. Wang X., Tian L., Li Y., Zhong C., Tian C. Effects of exogenous cellulose-degrading bacteria on humus formation and bacterial community stability during composting. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 359. 127458. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127458>
65. Wilkinson S. R. Plant nutrient and economic value of animal manures. *J. Anim. Sci*. 1979. Vol. 48. P. 121–133.
66. Xie K., Jia X., Xu P., Huang X., Gu W., Zhang F. ... Tang S. Improved composting of poultry feces via supplementation with ammonia oxidizing archaea. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 120. P. 70–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.029>
67. Zhan E., Xu S., Chen X., Wang B., Gao M., Fan Y. ... Si H. Effects of High Temperature Pretreatment and Inoculation of *Bacillus coagulans* on Promoting Aerobic Composting of Chicken Manure. *BioResources*. 2023. Vol. 18(2). P. 3089–3100. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.18.2.3089-3100>
68. Zhang H., Marchant-Forde J. N., Zhang X., Wang Y. Effect of Cornstalk Biochar Immobilized Bacteria on Ammonia Reduction in Laying Hen. *Manure Composting Molecules*. 2020. Vol. 25. 1560. <https://doi.org/10.3390/molecules25071560>
69. Zhang J., Zeng G., Chen Y., Yu M., Yu Z., Li H. ... Huang H. Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting. *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. P. 2950–2956. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.089>
70. Zhang L., Jia Y., Zhang X., Feng X., Wu J., Wang L., Chen G. Wheat straw: an inefficient substrate for rapid natural lignocellulosic composting. *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 209. P. 402–406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.004>
71. Zhang L., Li L., Pan X., Shi Z., Feng X., Gong B., Li J., Wang L. Enhanced Growth and Activities of the Dominant Functional Microbiota of Chicken Manure Composts in the Presence of Maize Straw. *Front Microbiol*. 2018. Vol. 9. 1131. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2018.01131>
72. Zhao Y., Lu Q., Wei Y., Cui H., Zhang X., Wang X. ... Wei Z. Effect of actinobacteria agent inoculation methods on cellulose degradation during composting based on redundancy analysis. *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 219. P. 196–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.117>
73. Zhou S., Zhang X., Liao X., Wu Y., Mi J., Wang Y. Effect of Different Proportions of Three Microbial Agents on Ammonia Mitigation during the Composting of Layer Manure. *Molecules*. 2019. Vol. 24. 2513. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules24132513>

Отримано 10.03.2023

BIOCOMPOSTING OF CHICKEN MANURE USING INTRODUCED MICROORGANISMS (A review)

L. A. Shevchenko¹, H. I. Riabukha²

¹Institute of Agricultural Microbiology and Agroindustrial Manufacture, NAAS, Chernihiv
e-mail: shevchenkolyubov@ukr.net

²Chernihiv Polytechnic National University

Objective. To analyse literature on microbiological aspects of composting in general and chicken manure in particular. To compare the features and consequences of composting using resident microbiota and introduction of specially selected microorganisms to the composted substrate. **Methods.** Analysis. Synthesis. Generalization. **Results.** Composting of chicken manure is a process carried out to ferment and stabilize organic waste. Destruction or significant reduction of the number of pathogenic microorganisms, the transformation of nitrogen and carbon into stable organic forms, the reduction of the volume of waste and the improvement of their fertilizing qualities are among the important consequences of composting as a method of processing chicken manure. Inoculation of chicken manure using effective selected microorganisms is a measure that stimulates the proliferation of resident microbial populations, increases the number of microbiota in communities capable of generating the desired enzymes, and thus significantly speeds up and improves the composting process. Currently, technologies for composting chicken manure using exogenous microorganisms have been developed, which allow solving the key problem associated with nitrogen losses, which increases the value of manure as a source of organic fertilizers. However, the large species and numerical diversity of the “aboriginal” microbiota in poultry manure complicates the process of introducing agronomically valuable microorganisms to the composted substrate. The complexity of the composting process is also due to the impossibility of generalizing the initial properties and composition of the manure, which depend on the diet of poultry, management conditions on farms, etc. **Conclusion.** A brief analysis of the role of microorganisms in chicken manure composting shows the need for mandatory optimization of the carbon/nitrogen ratio in the substrate, taking into account microbiological aspects of the process, the importance of using selected microorganisms to improve the features of the final product.

Key words: biocomposting, chicken manure, microorganisms, inoculation.

REFERENCES

1. Shuvar, I. A. (Ed.) (2015). *Vyrobnytstvo ta vykorystannia orhanichnykh dobryv: monohrafiia* [Production and use of organic fertilizers: monograph]. Ivano-Frankivsk : Symfoniaforte [in Ukrainian].
2. Volkohon, V. V., Derkach, S. M., Dimova, S. B., Miahka, M. V., Lutsenko, N. V., Shtanko, N. P., & Nakonechna, L. T. (2018). Biokompostuvannia orhanichnoho substratu na osnovi ptashynoho poslidu za introduktsii asotsiatsii hrybiv *Trichoderma harzianum* 128 [Biocomposting of organic substrate based on bird droppings with the introduction of *Trichoderma harzianum* 128 mushroom association]. *Ahroekolohichni zhurnal — Agroecological journal*, 1, 108–114 [in Ukrainian].
3. Volkohon, V. V., Miahka, M. V., Dimova, S. B., Derkach, S. M., Pyrih, O. V., & Lutsenko, N. V. (2019). *Vplyv introduktsii tseliulozolytychnykh mikroorhanizmiv na mikrobotsenoz v umovakh kompostuvannia kuriachoho poslidu* [The influence of the introduction of cellulolytic microorganisms on the microbocenosis in the conditions of composting chicken manure.]. *Visnyk ahrarnoi nauky — Herald of Agrarian Science*, 97, 5 (794), 53–64 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201905-07>
4. Derkach, S. M., Volkohon, V. V., Nakonechna, L. T., Lutsenko, N. V., & Shtanko, N. P. (2015). *Rozvytok Trichoderma harzianum* 128 na riznykh etapakh kompostuvannia kuriachoho poslidu [Development of *Trichoderma harzianum* 128 at different stages of chicken manure composting]. *Silskohospodarska mikrobiolohiia — Agricultural microbiology*, 21, 3–6 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.21.3-6>

5. Atkinson, C. F., Jones, D. D., & Gauthier, J. J. (1996). Biodegradability and Microbial Activities During Composting of Poultry Litter. *Poultry Science*, *75*, 608–617.
6. Awasthi, M. K., Chen, H., Wang, Q., Liu, T., Duan, Y., Awasthi, S. K., Ren, X., Tu, Z., Li, J., Zhao, J., & Zhang, Z. (2018). Succession of bacteria diversity in the poultry manure composted mixed with clay: Studies upon its dynamics and associations with physicochemical and gaseous parameters. *Bioresource Technology*, *267*, 618–625. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.094>
7. Barrington, S., Choiniere, D., Trigui, M., & Knight, W. (2002). Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses. *Bioresource Technology*, *83*, 189–194.
8. Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, *100*, 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
9. Cao, Y., Huang, H., Qian, Y., Wang, L., Xu, Y., Jin, H. ... Chang, Z. (2017). Hyperthermophilic pretreatment device and its application on improving decomposition effect for chicken manure and rice straw aerobic composting. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *33*(13), 243–250. <http://dx.doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.032>
10. Chang, R., Li, Y., Chen, Q., Gong, X., & Qi, Z. (2020). Effects of carbon-based additives and ventilation rate on nitrogen loss and microbial community during chicken manure composting. *PLoS ONE*, *15*(9), e0229880. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229880>
11. Chen, L., Chen, Y., Li, Y., Liu, Y., Jiang, H., Li, H. ... Zou, B. (2023). Improving the humification by additives during composting: A review. *Waste Management*, *158*, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.040>
12. Chen, Z., & Jiang, X. (2014). Microbiological Safety of Chicken Litter or Chicken Litter-Based Organic Fertilizers: A Review. *Agriculture*, *4*, 1–29. <https://doi.org/10.3390/agriculture4010001>
13. Colueke, C. G. (1954). A Critical Evaluation of Inoculum in Composting. *Appl. Microbiol*, *2*, 45–33.
14. Cui, P., Liao, H., Bai, Y., Li, X., Zhao, Q., Chen, Z. ... Zhou, S. (2019). Hyperthermophilic composting reduces nitrogen loss via inhibiting ammonifiers and enhancing nitrogenous humic substance formation. *Science of The Total Environment*, *692*, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.239>
15. Danon, M., Franke-Whittle, I. H., Insam, H., Chen, Y., & Hadar, Y. (2008). Molecular analysis of bacterial community succession during prolonged compost curing. *FEMS Microbiol Ecol*, *65*, 133–144. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00506.x>
16. De Gannes, V., Eudoxie, G., & Hickey, W. J. (2013). Prokaryotic successions and diversity in composts as revealed by 454-pyrosequencing. *Bioresource Technology*, *133*, 573–580. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.138>
17. Faure, D., & Deschamps, A. M. (1991). The Effect of Bacterial Inoculation On The Initiation Of Composting Of Grape Pulp. *Bioresource Technology*, *37*, 235–238.
18. Feng, C., Zeng, G., Huang, D., Hu, S., Zhao, M., Lai, C. ... Li, N. (2011). Effect of ligninolytic enzymes on lignin degradation and carbon utilization during lignocellulosic waste composting. *Process Biochemistry*, *46*(7), 1515–1520. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2011.01.038>
19. Ferrario, C., Alessandri, G., Mancabelli, L., Gering, E., Mangifesta, M., Milani, C. ... Ventura, M. (2017). Untangling the cecal microbiota of feral chickens by culturomic and metagenomic analyses. *Environ Microbiol*, *19*(11), 4771–4783. <http://dx.doi.org/10.1111/1462-2920.13943>
20. Gaind, S. (2014). Effect of fungal consortium and animal manure amendments on phosphorus fractions of paddy-straw compost. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *94*, 90–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.023>
21. Gaind, S., Nain, L., & Patel, V. B. (2009). Quality evaluation of co-composted wheat straw, poultry droppings and oil seed cakes. *Biodegradation*, *20*, 307–317. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9223-1>
22. Gao, M., Liang, F., Yu, A., Li, B., & Yang, L. (2010). Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. *Chemosphere*, *78*(5), 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.10.056>
23. Gu, W., Lu, Y., Tan, Z., Xu, P., Xie, K., Li, X., & Sun, L. (2017). Fungi diversity from different depths and times in chicken manure waste static aerobic composting. *Bioresource Technology*, *239*, 447–453. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.047>
24. Guerra-Rodríguez, E., Vazquez, M., & Dóaz-Ravi, M. (2000). Co-composting of barley wastes and solid poultry manure. *Bioresource Technology*, *75*, 223–225.
25. Gutarowska, B., Matusiak, K., Borowski, S., Rajkowska, A., & Brycki, B. (2014). Removal of odorous compounds from poultry manure by microorganisms on perlite–bentonite carrier. *J. Environ. Manage*, *141*, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.017>
26. Hidalgo, D., Corona, F., & Martin-Marroguin, J. M. (2022). Manure biostabilization by effective microorganisms as a way to improve its agronomic value. *Biomass Conversion and Biorefinery*,

- 12, 4649–4664. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02428-x>
27. Huang, Y., Chen, Y., Huang, H., Shah, M. G., Lin, J., Yan, M. ... Xiao, X. (2023). Hyperthermophilic pretreatment composting can reduce ammonia emissions by controlling proteolytic bacterial community and the physicochemical properties. *Bioresources and Bioprocessing*, 10:37. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00659-y>
28. Iyappan, P., Karthikeyan, S., & Sekar, S. (2011). Changes in the composition of poultry farm excreta (PFE) by the cumulative influence of the age of birds, feed and climatic conditions and a simple mean for minimizing the environmental hazard. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(5), 847–859.
29. Juliano, B. O. (1985). Rice hull and rice straw. In: *Chemistry and Technology*, 2nd edn. American Association of Cereal Chemists, Minnesota. 689–755.
30. Junqiu, W., Zhao, Y., Zhao, W., Yang, T., Zhang, X., Xie, X. ... Wei, Z. (2017). Effect of precursors combined with bacteria communities on the formation of humic substances during different materials composting. *Bioresource Technology*, 226, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.031>
31. Kausar, H., Ismail, M. R., Saud, H. M., Othman, R., & Habib, S. (2013). Use of Lignocellulolytic Microbial Consortium and pH Amendment on Composting Efficacy of Rice Straw. *Compost Science & Utilization*, 21, 121–133. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2013.842131>
32. Kavitha, R., Subramanin, P. (2007). Bioactive Compost — A Value Added Compost with Microbial Inoculants and Organic Additives. *Journal of Applied Sciences*, 7(17), 2514–2518.
33. Kelleher, B. P., Leahy, J. J., Henihan, A. M., O'Dwyer, T. F., Sutton, D., & Leahy, M. J. (2002). Advances in poultry litter disposal technology — a review. *Bioresource Technology*, 83, 27–36.
34. Kersters, K., De Vos, P., Gillis, M., Swings, J., Vandamme, P., & Stackebrandt, E. (2006). Introduction to the Proteobacteria. In M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer, E. Stackebrandt (Eds.). *The Prokaryotes* (pp. 3–37). New York: Springer. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.004>
35. Li, J., Wang, X., Cong, C., Wan, L., Xu, Y., Li, X. ... Wang, L. (2020). Inoculation of cattle manure with microbial agents increases efficiency and promotes maturity in composting. *3 Biotech*, 10, 128. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-2127-4>
36. Li, S., Li, J., Yuan, J., Li, G., Zang, B., & Li, Y. (2017). The influences of inoculants from municipal sludge and solid waste on compost stability, maturity and enzyme activities during chicken manure composting. *Environmental Technology*, 38(13-14), 1770–1778. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1291755>
37. Liu, H., Huang, Y., Duan, W., Qiao, C., Shen, Q., & Li, R. (2020). Microbial community composition turnover and function in the mesophilic phase predetermine chicken manure composting efficiency. *Bioresource Technology*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123658>
38. López-González, J. A., Suárez-Estrella, F., Vargas-García, M. C., López, M. J., Jurado, M. M., & Moreno, J. (2015). Dynamics of bacterial microbiota during lignocellulosic waste composting: Studies upon its structure, functionality and biodiversity. *Bioresource Technology*, 175, 406–416. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.123>
39. Ma, R., Liu, Y., Wang, J., Li, D., Qi, C., Li, G., & Yuan, J. (2022). Effects of oxygen levels on maturity, humification, and odor emissions during chicken manure composting. *J. Clean. Prod.*, 369, 133326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133326>
40. Mahimairaja, S., Bolan, N. S., Hedley, M. J., & Macgregor, A. N. (1994). Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: An incubation experiment. *Bioresource Technology*, 47(3), 265–273. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90190-2](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90190-2)
41. Martin, A. M., Evans, J., Portger, D., & Patel, T. R. (1993). Comparative effects of peat and sawdust employed as bulking agents in composting. *Bioresour. Technol.*, 44, 65–69.
42. Mi, J., Chen, X., & Liao, X. (2019). Screening of single or combined administration of 9 probiotics to reduce ammonia emissions from laying hens. *Poultry Science*, 98(9), 3977–3988. <https://doi.org/10.3382/ps/pez138>
43. Motte, J.-C., Watteau, F., Escudié, R., Steyer, J.-P., Bernet, N., Delgenes, J.-P., & Dumas, C. (2015). Dynamic observation of the biodegradation of lignocellulosic tissue under solid-state anaerobic conditions. *Bioresource Technology*, 191, 322–326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.130>
44. Nakhshiniev, B., Perera, C., Biddinika, M. K., Gonzales, H. B., Sumida, H., & Yoshikawa, K. (2014). Reducing ammonia volatilization during composting of organic waste through addition of hydrothermally treated lignocellulose. *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 96, 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.08.011>
45. Nauanova, A., Yerpasheva, D., Shakhabayeva, G., Yermekov, A., & Baimbetova, E. (2020). Identification and screening of microorganisms common in poultry manure. *Sys. Rev. Pharm.*, 11(12), 1582–1588.
46. Nodar, R., Acea, M. J., & Carballas, T. (1990). Microbial Populations of Poultry Pine-Sawdust Litter. *Biological Wastes*, 33, 295–306.
47. Oshima, T., & Moriya, T. (2008). Prelimi-

- nary Analysis of Microbial and Biochemical Properties of High-Temperature Compost. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1125, 338–344. <https://doi.org/10.1196/annals.1419.012>
48. Pandey, A. K., Gaiind, S., Ali, A., & Nain, L. (2009). Effect of bioaugmentation and nitrogen supplementation on composting of paddy straw. *Biodegradation*, 20, 293–306. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9221-3>
49. Romero-Yam, L. A., Almaraz-Suárez, J. J., Velasco-Velasco, J., Galvis-Spinola, A., & Gavi-Reyes, F. (2015). Microbial dynamics during composting of filter cake reactivated with chicken manure. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 21(1), 21–31. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.09.032>
50. Selvamani, K., Annadurai, V., & Soundarapandian, S. (2019). Improved co-composting of poultry manure with complementary consortium of indigenous *Bacillus* spp. *Biotech*, 9:215. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1745-1>
51. Seoudi, O. (2013). Enhancement of Cotton Stalks Composting with Certain Microbial Inoculations. *Journal of Advanced Laboratory Research in Biology*, 4(1), 26–35.
52. Sharma, A., Sharma, R., Arora, A., Shah, R., Singh, A., Pranaw, K., & Nain, L. (2014). Insights into rapid composting of paddy straw augmented with efficient microorganism consortium. *Int J Recycl Org Waste Agricult*, 3:54. <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0054-2>
53. Shen, Y., Ren, L., Li, G., Chen, T., & Guo, R. (2011). Influence of aeration on CH₄, N₂O and NH₃ emissions during aerobic composting of a chicken manure and high C/N waste mixture. *Waste Management*, 31, 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.019>
54. Shi, M., Wei, Z., Wang, L., Wu, J., Zhang, D., Wei, D. ... Zhao Y. (2018). Response of humic acid formation to elevated nitrate during chicken manure composting. *Bioresource Technology*, 258, 390–394. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.056>
55. Tan, K. H. (2014). Humic matter in soil and the environment: principles and controversies. CRC Press.
56. Tiquia, S. M., Wan, H. C., & Tam, N. F. Y. (2002) Microbial Population Dynamics and Enzyme Activities During Composting. *Compost Science & Utilization*, 10(2), 150–161. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702075>
57. United States Patent. Biological poultry litter treatment composition and its use. Thomas G. Rehberger, Wauwatosa, WS. Patent Number: 5,945,333. Date of Patent: Aug. 31, 1999.
58. Uribe, J. F., Estrada, M. M., & Córdoba, S. (2001). Evaluación de los microorganismos eficaces (EM) en producción de abono orgánico a partir del estiércol de aves de jaula. *Rev Colomb Cienc Pecu*, 14(2), 164–172.
59. Vargas-García, M. C., Lopez, M. J., Suarez, F., & Moreno, J. (2005). Laboratory study of inocula production for composting processes. *Biore-source Technology*, 96, 797–803.
60. Vargas-García, M. C., Suárez-Estrella, F., López, M. J., & Moreno, J. (2007). Effect of inoculation in composting processes: modifications in lignocellulosic fraction. *Waste Management*, 27, 1099–1107.
61. Wan, J., Wang, X., Yang, T., Wei, Z., Banerjee, S., Friman, V.-P. ... Shen Q. (2021). Live-stock Manure Type Affects Microbial Community Composition and Assembly During Composting. *Front. Microbiol*, 12, 621126. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.621126>
62. Wan, L., Wang, X., Cong, C., Li, J., Xu, Y., Li, X. ... Wang, L. (2020). Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw. *Bioresource Technology*, 301, 122730. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122730>
63. Wang, G., Kong, Y., Yang, Y., Ma, R., Shen, Y., Li, G., & Yuan, J. (2022). Superphosphate, biochar, and a microbial inoculum regulate phytotoxicity and humification during chicken manure composting. *Sci Total Environ*, 10(824), 153958. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153958>
64. Wang, X., Tian, L., Li, Y., Zhong, C., & Tian, C. (2022). Effects of exogenous cellulose-degrading bacteria on humus formation and bacterial community stability during composting. *Bioresource Technology*, 359, 127458. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127458>
65. Wilkinson, S. R. (1979). Plant nutrient and economic value of animal manures. *J. Anim. Sci*, 48, 121–133.
66. Xie, K., Jia, X., Xu, P., Huang, X., Gu, W., Zhang, F. ... Tang, S. (2012). Improved composting of poultry feces via supplementation with ammonia oxidizing archaea. *Bioresource Technology*, 120, 70–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.029>
67. Zhan, E., Xu, S., Chen, X., Wang, B., Gao, M., Fan, Y. ... Si, H. (2023). Effects of High Temperature Pretreatment and Inoculation of *Bacillus coagulans* on Promoting Aerobic Composting of Chicken Manure. *BioResources*, 18(2), 3089–3100. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.18.2.3089-3100>
68. Zhang, H., Marchant-Forde, J. N., Zhang, X., & Wang, Y. (2020). Effect of Cornstalk Biochar Immobilized Bacteria on Ammonia Reduction in Laying Hen. *Manure Composting Molecules*, 25(1560). <https://doi.org/10.3390/molecules25071560>
69. Zhang, J., Zeng, G., Chen, Y., Yu, M., Yu, Z., Li, H. ... Huang, H. (2011). Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting. *Bioresource Technology*, 102, 2950–2956. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.089>

70. Zhang, L., Jia, Y., Zhang, X., Feng, X., Wu, J., Wang, L., & Chen, G. (2016). Wheat straw: an inefficient substrate for rapid natural lignocellulosic composting. *Bioresource Technology*, *209*, 402–406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.004>

71. Zhang, L., Li, L., Pan, X., Shi, Z., Feng, X., Gong, B. ... Wang, L. (2018) Enhanced Growth and Activities of the Dominant Functional Microbiota of Chicken Manure Composts in the Presence of Maize Straw. *Front. Microbiol.*, *9*:1131. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2018.01131>

72. Zhao, Y., Lu, Q., Wei, Y., Cui, H., Zhang, X., Wang, X. ... Wei, Z. (2016). Effect of actinobacteria agent inoculation methods on cellulose degradation during composting based on redundancy analysis. *Bioresource Technology*, *219*, 196–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.117>

73. Zhou, S., Zhang, X., Liao, X., Wu, Y., Mi, J., & Wang, Y. (2019). Effect of Different Proportions of Three Microbial Agents on Ammonia Mitigation during the Composting of Layer Manure. *Molecules*, *24*, 2513. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules24132513>

Received 10.03.2023