

**О. А. Сагдєєва,**

**Г. В. Крусір,** д. т. н., проф., зав. каф.

**А. Л. Цикало,** д. х. н., проф., проф. каф.

Одеська національна академія харчових технологій  
вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 650399

**Г. Лойсєнбергер,** д. т. н., проф. Інституту екопроектів

Університет прикладних наук та мистецтв Північно-Західної Швейцарії  
4142 Базель, 4053 Мюнхенштайн, Швейцарія

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПОСТУВАННЯ ХАРЧОВОЇ СКЛАДОВОЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Управління твердими побутовими відходами в Україні залишається одним з найактуальніших завдань у сфері екологічної безпеки через щорічне накопичення на звалищах та полігонах і відсутність дієвих механізмів. Оскільки до 40 % твердих побутових відходів відноситься до органічних, що легко розкладаються, вилучення цієї частини відходів зі звалищ через компостування та перетворення відходу на вторинний матеріальний ресурс суттєво зменшить екологічне навантаження на фактично діючі та потенційно заплановані звалища. Аеробне компостування є однією з найкращих найбільш доступних технологій для інтегрованої системи управління відходами за рахунок мінімізації антропогенного впливу на довкілля, відповідності новітнім вітчизняним та зарубіжним розробкам, економічній та практичній прийнятності технології.

Метою експериментального дослідження є вивчення можливості прискорення процесу компостування харчової складової твердих муніципальних відходів за рахунок внесення мікробіологічних добавок для впровадження в якості природоохоронної технології на звалищах. У статті представлено результати дослідження впливу мікробіологічної добавки на перебіг процесів компостування харчової складової твердих побутових відходів з метою його прискорення в мезофільному і термофільному температурних режимах з керованими параметрами. Для підвищення ефективності процесу компостування та порівняння особливостей перебігу процесів в якості інокуляту використовували ґрунт, в якості мікробіологічної добавки – екстракт з ґрунту. Показано, що мікробіологічний комплекс прискорює процес компостування харчової складової твердих побутових відходів в 3,3 рази за термофільного режиму і в 2,1 рази за мезофільних умов проведення процесу компостування, що свідчить про ефективність його використання в процесах переробки твердих побутових відходів з метою підвищення загального рівня екологічної безпеки.

**Ключові слова:** компостування, відходи, суміш, яка компостується, мікробіологічна добавка, мезофільний і термофільний режими.

### 1. Постановка проблеми.

Дослідженням впливу звалищ та полігонів твердих муніципальних відходів на компоненти довкілля приділяється велика увага в більшості країн світу. Облаштовані без сучасних інженерно-екологічних вимог, звалища відходів є потужними джерелами забруднення атмосфери, гідросфери та ґрунтів [1, 2].

Деградація ґрунтового покриву відноситься до числа найбільш гострих проблем сучасного природокористування. З вичерпанням запасів гумусу та біофільних елементів в ґрунтах відбувається різке порушення органічного й мінерального харчування ґрунтової біоти, наростають умови оліготрофності, знижується загальна біологічна активність й родючість ґрунтів, їхня стійкість до ерозії, хімічного й бактеріального забруднення. Актуальність цієї проблеми посилюється дефіцитом органічних добрив, без внесення яких відновлення ґрунтової родючості є неможливим.

За даними моніторингу полігонів захоронення твердих побутових відходів (ТПВ) рослинні відходи складають значну частку (25...30 %) в загальному обсязі ТПВ та включають садово-паркові (15...17 %) й харчові (10...13 %) відходи [3]. Найбільш екологічно доцільним методом

переробки такого виду відходів є компостування, яке відноситься до біотехнологічних методів утилізації, базується на природних процесах і тому є безпечним для живих організмів й довкілля.

В країнах ЄС та у світі стрімко поширюється органічне виробництво як цілісна система раціонального природокористування, що стає основою застосування сучасних технологій компостування органічної сировини з отриманням якісного продукту переробки.

Переробка твердих відходів в компост – є сучасним досконалим методом їх знешкодження та подальшого використання. Основними перевагами застосування технологій компостування в обробці відходів є повернення наявних у відходах поживних речовин рослин в екосистеми, скорочення кількості відходів, одночасне корисне використання інших органічних відходів в компості (листя, трава, гній, очисний мул комунальних вод тощо). Проте, загальна частка відходів, що переробляються компостуванням, залишається незначною. Так, в Європі з отриманням компосту переробляють близько 2 % відходів. В СНД побудовано низку компостних підприємств, але практично всі вони виробляють компост низької якості [4].

## 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Як природоохоронну технологію щодо утилізації органічної складової твердих побутових відходів на звалищах запропоновано компостування як таку, що призводить до деструкції відходів за допомогою мікроорганізмів та отримання гігієнічно безпечної нетоксичної гумусоподібної речовини, яка з успіхом використовується, в першу чергу, як стимулятор відновлення ґрунтових екосистем, і в другу – як органічне добриво. Проте компостування характеризується відносно невисокою популярністю в порівнянні з іншими методами утилізації відходів через низку його недоліків, таких як довгий виробничий цикл та, іноді, одержання продукту нестабільної якості. Через це багато досліджень в галузі переробки твердих побутових відходів присвячено способам прискорення процесу компостування через розробку високоефективних апаратів компостування та зміну біотичних (вермикомпостування, використання спеціалізованих культур й співтовариств мікроорганізмів) або абіотичних (температура, рН, аерація, вологість тощо) параметрів перебігу процесу [5, 6].

Пошук оптимального співвідношення біотичних та абіотичних параметрів залишається першочерговою задачею в технології компостування. Так, температурний режим є основою забезпечення ефективності процесу компостування, в якому виділяються чотири температурні стадії: мезофільна, термофільна, стадії охолодження та кінцевого дозрівання компосту. Дослідження [6] доводять, що мезофільна стадія, а також стадії охолодження та дозрівання не є необхідними частинами процесу компостування, а, відповідно, період компостування може бути значно скорочено, якщо суміш, що компостується, нагрівати штучно з метою підтримання необхідних умов для росту термофілів. Однак, підігрівання супроводжується значними енергозатратами, а отже, додатковим навантаженням на компоненти довкілля, тому відмова від мезофільного режиму компостування не є раціональним еколого-економічним рішенням.

Іншим важливим параметром аеробного компостування є аерація. Останніми дослідженнями доведено, що використання вихідної газоповітряної суміші в процесі аерації з концентрацією кисню 5...18% [7] та примусова аерація зі швидкістю нагнітання повітря 0,41 л/хв. на 1 кг суміші, що компостується [8] залежно від температурного режиму компостування з частковим поверненням Нітрогену, тепла та вологи в органічні відходи є оптимальними абіотичними чинниками прискорення процесу компостування.

Вміст води в сумішах, що компостуються, має суттєве значення для одержання високоякісного компосту. Звичайно процес перебігає цілком ефективно з вологовмістом в компостній кучі близько 35...65%. Підтримувати ці значення особливо важливо при примусовій аерації, коли вода видаляється разом з газами, що виділяються. Вологість суміші, яка компостується, з метою

забезпечення високої ефективності процесу не повинна знижуватись нижче, ніж 50%.

Значення рН в суміші – ще один важливий показник ефективності процесу компостування. Звичайно значення рН суміші, яка компостується, змінюється від слабкокислих (в результаті синтезу карбонових кислот) до слабколужних (через утворення іонів амонію) в інтервалі від 4,5 до 8,1. Як правило, ці значення тісно пов'язані з діяльністю мікроорганізмів, які приймають участь в компостуванні [9].

Серед сучасних дослідників процесу компостування як раціонального способу управління відходами інноваційними є праці М. В. Гаценка [10], М. К. Лінника [11], О. О. Ляшенка [12], В. В. Шацького [13], в яких багато уваги приділено питанням технології компостування, механізації приготування субстрату, оптимізації керованих параметрів перебігу процесу, оформленню буртів, складу субстрату та співвідношенню основних поживних речовин в ньому. Проте, поряд з питаннями прискорення процесу компостування як заходу зменшення органічних відходів, актуальним залишається утворення конкурентно-спроможного органічного добрива, яке за еколого-економічними показниками здатне задовольняти потреби агропромислового комплексу країни.

## 3. Постановка завдання та його вирішення.

Метою цього дослідження було вивчення можливості прискорення процесу компостування рослинних відходів шляхом внесення мікробіологічних добавок. Передбачалося, що їх додавання до складу сировинного матеріалу приведе до активації мікробної активності на початкових стадіях процесу.

В ході даного дослідження необхідно було виконати наступні завдання:

1) дослідити вплив мікробіологічних добавок на процеси, що відбуваються при компостуванні органічних відходів у мезофільному та термофільному режимах;

2) дослідити умови перебігу процесів компостування за основними абіотичними і біотичними показниками – за зміною температури, рН середовища та чисельності мікроорганізмів в суміші, що компостується, витратою Карбону (емісією CO<sub>2</sub>) із реактора;

3) визначити зрілість компосту за індексом пророщування і співвідношенням вмісту загального Карбону і Нітрогену в суміші, яка компостувалась.

### 3.1. Матеріали та методи.

Як сировину для компостування використовували суміш харчових (очистки картоплі, кабачків й моркви, листя капусти), сільськогосподарських (бур'ян) і садово-паркових (листяний опад) відходів у ваговому співвідношенні 1:1:1. Листяний опад використовували як наповнювач. Сировину подрібнювали до розмірів 10...15 мм, підсушували на повітрі протягом 2 годин і загрузали в реактор. Для підвищення ефективності процесу компостування й порівняння особливостей перебігу процесів екстракт з ґрунту використовували як мікробіологічну добавку. Варто зазначити, що за результатами досліджень [14] структура мікробних комплексів є

невід'ємною складовою детальної характеристики ґрунтів, тому доцільно використовувати його мікробні комплекси як мікробіологічну добавку для компостування в природних умовах.

Експеримент проводили в трьох стаціонарних реакторах об'ємом 3 дм<sup>3</sup> з примусовою аерацією протягом 6 тижнів. Умови проведення експерименту наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Умови проведення експерименту

Номер реактора	Інокулят	Добавка	Температура навколишнього середовища, °С
1	ґрунт	-	18...20
2	ґрунт	мікробіологічна	18...20
3	ґрунт	мікробіологічна	55

В кожний реактор вносили суміш, яка компостується, в кількості 1,2 (2/3 об'єму реактора) з вологістю 72 %, яка перемішувалась зі 100 г ґрунту (типовий для регіону чорнозем південний мало гумусний) в якості інокуляту. В реактор 1 (контроль) додавали 100 мл води дистильованої, а в реактори 2 і 3 додавали 100 мл мікробіологічної добавки, яка є водним екстрактом ґрунту, одержаного при інкубації ґрунту з водою за гідромодулем 1 : 10 протягом 20 хв. при перемішуванні.

Як мікробіологічну добавку для підвищення ефективності процесу компостування використовували екстракт з ґрунту (чорнозему південного), який містить целюлозолітичні мікроорганізми й бактеріальні колонії. До числа найбільш активних целюлозоруйнівних мікроорганізмів відносяться бактерії і мікроміцети, проте домінують роль в розкладанні целюлозомісних відходів при проведенні процесу компостування мають бактерії [15].

Реактори 1 і 2 були ізольовані від дії температури навколишнього середовища. Реактор 3 помістили в термостат зі встановленою температурою 55 °С з метою термофільного компостування. Компостування продовжувалось протягом 6 тижнів, при цьому суміш, яка компостувалась, кожного дня перемішували й зволожували для підтримання вологості на рівні 70...75 %. Кожного тижня проводили відбір наважок масою 10 г для проведення досліджень.

Контроль параметрів процесу компостування здійснювали за зміною температури, значення рН та чисельності мікроорганізмів в суміші, що компостується, а також емісії CO<sub>2</sub> із реактора [16]. Зрілість компосту, який отримували, визначали за індексом пророщування [17] і співвідношенням вмісту загального Карбону і Нітрогену в суміші, яка компостувалась [18].

Температуру всередині суміші, яка компостувалась, вимірювали з допомогою спиртового термометру, який закріплено в кришці реактора, нижній кінець якого знаходився в суміші, яка компостується.

Один раз на тиждень проводили відбір газової фракції із реакторів з допомогою одноразових пластикових шприців на 50 см<sup>3</sup>. Приєднували шприц до трубки для відводу газів із реактора, потім реактор струшували для вилучення газів з об'єму суміші, яка компостується, і через 5 хв. відбирали пробу газової суміші в кількості 50 см<sup>3</sup>. Кількість вуглекислого газу в пробі визначали за допомогою газового хроматографа «Хроматек Кристалл 5000.2».

Наважки проб масою 5 г суміші, що компостується, поміщали в металічні бокси та висушували до постійної маси для визначення вологості, загального Карбону q загального Нітрогену. Доведені до постійної маси проби подрібнювали в фарфоровій ступці, просіювали через сито з розміром пор 0,25 мм і визначали загальний органічний Карбон за Тюрнімом і загальний Нітроген за Кьельдалем [18]. Наважки вологих проб масою 5 г поміщали в конічні колби на 250 см<sup>3</sup>, змішували з 50 см<sup>3</sup> дистильованої води, струшували на качалці протягом 1 год., потім фільтрували через складчастий фільтр для визначення рН, чисельності мезофільних і термофільних мікроорганізмів і коефіцієнта всхожості.

Значення рН водної витяжки визначали з допомогою лабораторного рН-метра Hanna 221X. Чисельність мікроорганізмів визначали з допомогою посіву на тверде поживне середовище в чашки Петрі за методом Коха. Коефіцієнт всхожості визначали за кількістю насіння редису посівного, що проросло, із десяти і довжинами проростків в водних витяжках із компостів порівняно з контролем (дистильована вода). Контроль якості готового продукту визначали за співвідношенням C/N та вмістом в сухій речовині загального Нітрогену.

### 3.2. Результати досліджень та їх обговорення

У літературі досить повно подано інформацію про біохімічні, мікробіологічні і інші аспекти процесу компостування органічних відходів, що утворюються в сільському і комунальному господарстві, харчовій промисловості тощо. Тому в подальшому необхідно було оцінити, чи впливає інокуляція компостних сумішей біологічними добавками на процес компостування ТПВ. В цілому, завершеність процесу компостування характеризується двома поняттями – «стабільність» і «зрілість» компосту, які, незважаючи на свої концептуальні відмінності, одночасно використовуються для визначення ступеню розкладання органічних речовин під час процесу компостування. Були обрані параметри, що дозволяють оцінити як інтенсивність розкладання органічних речовин (температура, вміст органічних речовин, розчинного органічного Карбону і амонійного Нітрогену), так і його стабільність (респіраторна активність і целюлозолітична активність, чисельність бактерій і мікроміцетів) і зрілість (рН, фітотоксичність).

Результати досліджень зміни рН суміші, яка компостується, подані на рисунку 1.

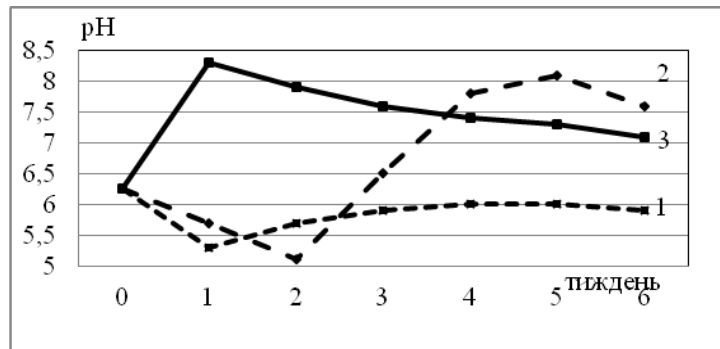


Рисунок 1 – Зміна значення рН суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:  
1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

Початкове значення рН сировини було слабкокислою, близьким до нейтрального (6,3). Після початку компостування значення рН в мезофільному режимі в реакторі 2 до другого тижня знижувалося до 5,1, на п'ятому тижні піднімалося до 8,1, потім знижувалося до 7,6. Це можна пояснити утворенням органічних кислот в процесі ферментації, а потім їх нейтралізацією. За термофільних умов в реакторі 3 після першого тижня компостування рН середовища стало слабколужним (8,3), що можна пояснити виділенням четвертинних амонієвих основ та солей, а потім поступово знижувалося, стабілізувалося на значенні 7,1. Таким чином, в реакторах з мікробіологічною добавкою при мезофільному компостуванні на початковій стадії компостування рН відхилялося в бік слабкокислих, при термофільному – в бік слабколужних значень. Значення рН, які спостерігаються в реакторах 2 і 3 наприкінці процесу компостування, є оптимальними для вирощування рослин та відповідають

вимогам, що висуваються до зрілого компосту. Стабілізація і навіть деяке зниження рівня рН, яке відмічено на останньому тижні, скоріше за все є результатом утворення гумусоподібних речовин, про що опосередковано свідчить стабілізація вмісту органічної речовини й розчинного органічного Карбону в цей період.

Результати контролю чисельності колоній мікроорганізмів цілком відповідають уявленням про криві зростання культури в періодичних умовах (рисунки 2, 3).

Швидкість деструкції органічної речовини безпосередньо залежить від чисельності мікроорганізмів й складу мікробних колоній суміші, що компостується. В реакторі 2 спостерігалось прискорене зростання мезофільної мікрофлори, тому що температура в них була 23...25 °С. В реакторі 3 термофіли досягали значно більшої чисельності, оскільки температурні умови були більш придатними для їх росту (55 °С).

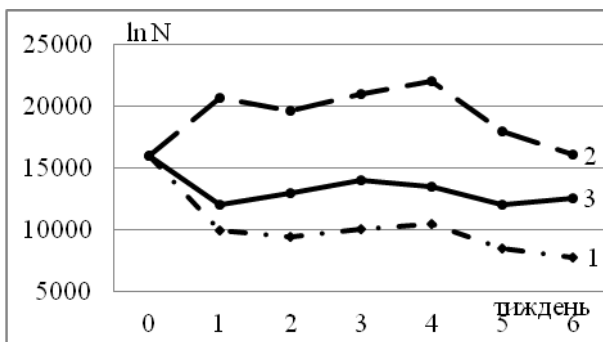


Рисунок 2 – Зміна чисельності колоній мезофільних мікроорганізмів в суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:  
1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

Таким чином, додавання біодобавки на основі екстракту ґрунту підвищує чисельність мікрофлори в зразках компосту в 2...3 рази порівняно з контролем. Оскільки за деструкцію органічної частини суміші, що компостується, відповідають бактеріальні колонії, то їх збільшення в різних

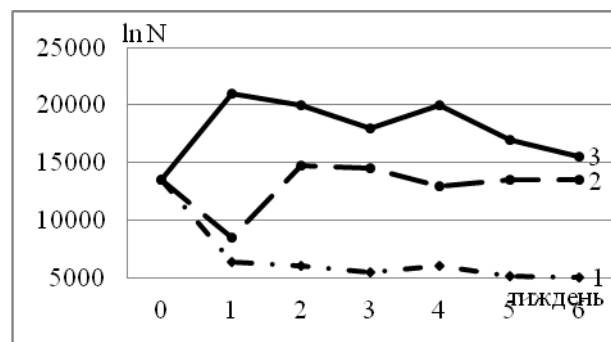


Рисунок 3 – Зміна чисельності колоній термофільних мікроорганізмів в суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:  
1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

режимах компостування очікувано буде активувати утворення компосту.

Про активність мікроорганізмів можна судити за інтенсивністю їх дихання (споживання кисню або виділення вуглекислого газу). Представлені на рисунку 4 залежності зміни концентрації CO<sub>2</sub> в

просторі реактора від часу показово демонструють зміни активності співтовариства мікроорганізмів в процесі компостування.

Активність мікроорганізмів значно вище в реакторі, що знаходиться в термофільних умовах (реактор 3). В реакторах 2 і 3 пік активності припадає на період з другого по третій тиждень. Піки респіраторної активності співпадають зі

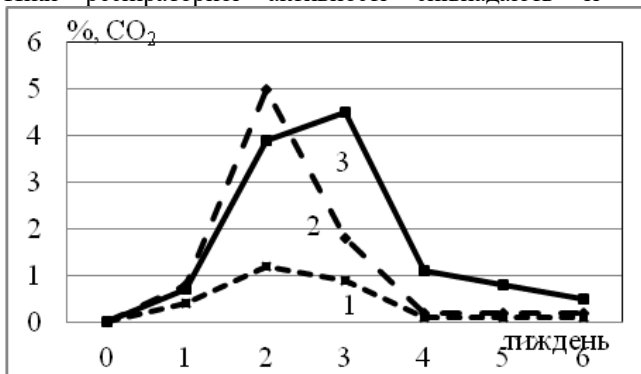


Рисунок 4 – Зміна емісії CO<sub>2</sub> із реакторів протягом процесу компостування суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:  
1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

Оскільки піки активності в мезофільних та термофільних умовах не співпадають, можна припустити, що в термофільних умовах на третьому тижні бактеріальні колонії починають більш активно розкладати складні органічні сполуки. На завершальному етапі зниження та стабілізація рівня активності свідчить про те, що всі доступні речовини в суміші, що компостується, мінералізовано мікроорганізмами. Таким чином, введення мікробіологічної добавки стимулює підвищення активності співтовариства мікроорганізмів на початкових стадіях компостування – на протяжні трьох тижнів, що свідчить про те, що саме в ці терміни активно відбувається деструкція органічної частини суміші, що компостується.

Характер залежності зміни кількості загального Карбону від часу компостування, представлений на рисунку 5, приблизно однаковий для всіх трьох реакторів: в перші 4 тижні мінералізується більша кількість органічної речовини (близько 7 %), потім Карбон споживається незначно (3...4 %). Максимальні швидкості споживання органічних речовин у всіх реакторах спостерігалися після другого тижня, причому внесення мікробіологічної добавки збільшує швидкість розкладання Карбону вдвічі, що підтверджує роль ґрунтової мікрофлори в деструкції органічної частини суміші, що компостується, в обох температурних режимах.

Сумарні втрати загального Карбону (рисунок 6) були дещо значніші в реакторах 2 та 3 (21...22 %),

збільшенням швидкості деструкції органічної речовини.

В перші тижні компостування мікроорганізми активно розкладають легкодоступні сполуки, що призводить до збільшення продукції CO<sub>2</sub>. Саме в цей період спостерігається висока швидкість мінералізації органічної речовини та максимальне зниження вмісту розчинного органічного Карбону (рисунок 5).

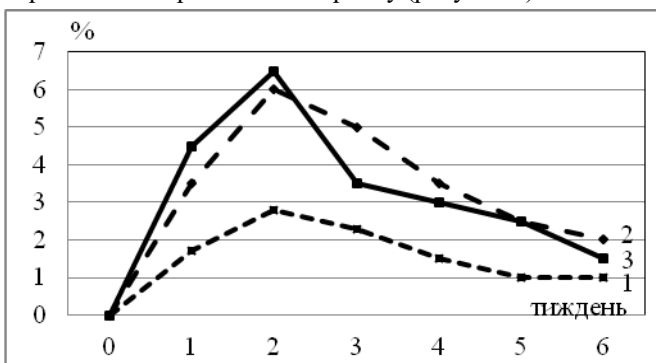


Рисунок 5 – Зміна швидкості втрат загального Карбону в суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:  
1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

ніж в реакторі 1 (близько 12 %). Таким чином, загальні втрати і швидкість втрат загального Карбону більш виражені при використанні мікробіологічної добавки як в термофільному, так і в мезофільному режимах, що свідчить про більшу ефективність процесу компостування, на яку, очевидно, впливають бактеріальні колонії біодобавки – відповідно термофільні та мезофільні.

Зміна вмісту загального Нітрогену характеризує динаміку мінералізації Нітрогенвмісних речовин. Як видно з рисунку 7, початковий вміст Нітрогену в реакторах різний: найбільша його кількість спостерігається в реакторах 3 і 2 (2 та 1,5 г/кг), що можна пояснити присутністю бактеріальних колоній (можливо, бульбочкових бактерій), проти 0,5 г/кг Нітрогену в контрольному реакторі без додавання мікробіологічної добавки.

Характер зміни вмісту загального Нітрогену в суміші, що компостується, практично ідентичний для всіх реакторів (рисунок 7). Максимальні швидкості втрати Нітрогену у всіх реакторах спостерігалися після другого тижня, причому в реакторах 2 і 3 вони були більше (3,5 г/кг в тиждень), ніж в реакторі 1. Подібні зміни вмісту загального Нітрогену на початку компостування пов'язані з активним розкладанням Нітрогенвмісних сполук та свідчать про присутність нестабільних речовин. В подальшому в усіх варіантах дослідження спостерігалось зниження рівня загального Нітрогену, яке до кінця шостого тижня склало 0,2...0,5 г/кг.

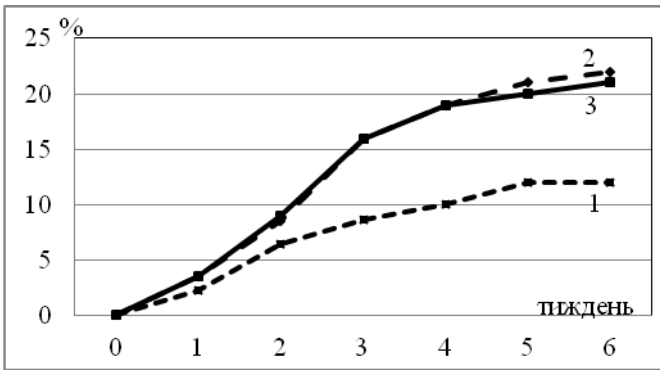


Рисунок 6 – Зміна швидкості втрат загального Карбону в суміші, яка компостується, в реакторах з мінеральною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:

1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

В цілому, наприкінці компостування всі досліджувані зразки продемонстрували вміст загального Нітрогену нижче рівня, який висувається до зрілих компостів [19]. Проте необхідно зазначити, що рівень Нітрогену в зрілих компостах змінюється в достатньо широкому діапазоні та залежить від часу компостування та складу вихідних компонентів. В нашому варіанті суміш, що компостується, не містила речовин, які характеризуються високим вмістом Нітрогену (гній, осади стічних вод, бобові культури рослин тощо), що пояснює знижену кількість Нітрогену в готових компостах.

Сумарні втрати Нітрогену (рисунок 8) в реакторах 2 та 3 виявилися найбільшими (близько 13 г/кг сухої маси, яка компостується). В контрольному реакторі втрати Нітрогену були меншими (8 г/кг сухої маси, яка компостується). Таким чином, втрати Нітрогену дещо збільшуються

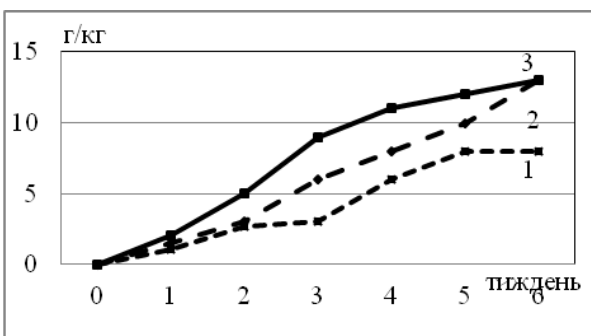


Рисунок 8 – Зміна швидкості інтегральних втрат загального Нітрогену в суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:

1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

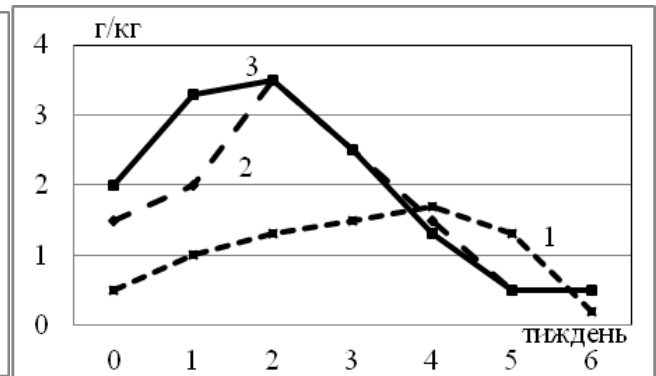


Рисунок 7 – Зміна швидкості втрат загального Нітрогену в суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:

1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

при термофільному компостуванні, проте і в термофільному, і в мезофільному режимах в разі внесення мікробіологічної добавки деструкція органічної речовини майже в 2 рази більша, ніж в контрольному зразку.

Зрілість компосту оцінюється за масовим співвідношенням в ньому загального Карбону і загального Нітрогену (C/N). Згідно з міжнародними стандартами якісний компост повинен мати C/N нижче 25. На рисунку 9 наведено залежність зміни C/N від тривалості компостування. Відношення C/N досягає мінімальних величин після другого тижня компостування і далі істотно не змінюється. Кінцеве співвідношення C/N у всіх одержаних компостах менше, ніж 25, що свідчить про скорочення дозрівання компосту при внесенні мікробіологічної добавки приблизно вдвічі, враховуючи швидкість його зміни.

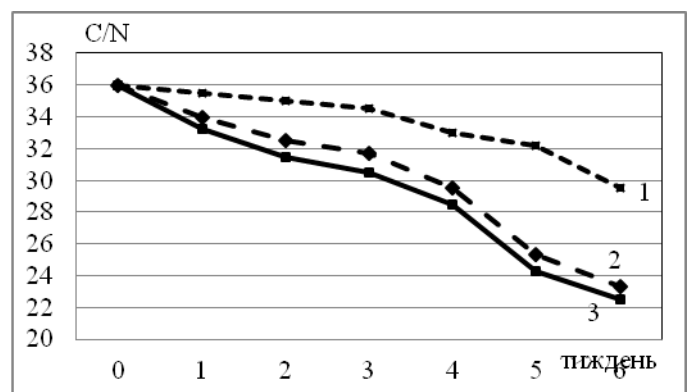


Рисунок 9 – Зміни відношення загального Карбону до загального Нітрогену в суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:

1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

Аналіз експериментального дослідження свідчить про те, що інтенсивність деструкції органічної частини суміші побутових відходів, що компостується, залежить від бактеріальних колоній, одержаних з екстракту ґрунту, та збільшується вдвічі як в мезофільних, так і в термофільних умовах. Активність термофільних мікроорганізмів дещо вища, проте, враховуючі енергетичні витрати на підігрівання суміші, що компостується, можна рекомендувати компостування в мезофільному режимі з додаванням біодобавки як ресурсозберігаючий засіб компостування органічних відходів.

Результати дослідження свідчать про те, що індекс пророщування насіння редису поступово знижується зі збільшенням тривалості компостування (рисунок 10). Компост з індексом пророщування менше, ніж 80 % вважається фітотоксичним, більше, ніж 80 % – зрілим. Після 6 тижнів компостування компости в реакторах 2 і 3 характеризуються індексом пророщування більше, ніж 100 %, що свідчить про те, що компости не тільки вільні від фітотоксинів, але і мають стимулюючу дію на пророщування.

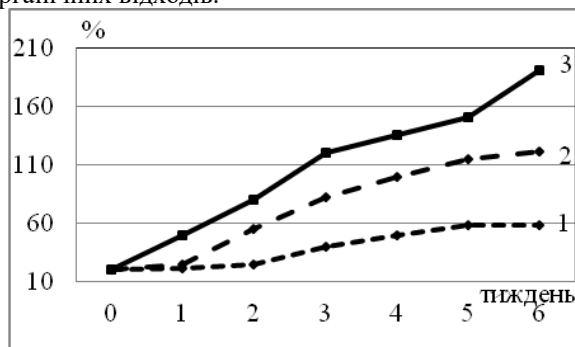


Рисунок 10 – Зміни індексу пророщування в процесі компостування в суміші, яка компостується, в реакторах з мікробіологічною добавкою в мезофільному та термофільному режимах у порівнянні з контрольним зразком:

1 – контрольний зразок; 2 – мезофільний режим; 3 – термофільний режим

Експериментальні дані дослідження дозволяють зробити висновок, що дозрівання компосту в термофільних умовах завершується швидше, ніж в мезофільних, а тривалість дозрівання компосту при внесенні мікробіологічної добавки прискорюється в 3,3 рази за термофільних умов та в 2,1 рази – за мезофільних.

Таким чином, температурний режим впливає на зрілість компосту на стадії пророщування та оцінки фітотоксичності компосту, проте не на інтенсивність деструкції органічної речовини, оскільки в мезофільному режимі руйнуючу роль бере на себе мезофільна мікрофлора приблизно в однаковому ступені як в термофільному – термофільна мікрофлора.

**Висновки.** Таким чином, результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок про доцільність компостування рослинних відходів з мікробіологічною добавкою як у випадку термофільного, так і у випадку мезофільного компостування.

Період дозрівання компосту при використанні мікробіологічної добавки становить 6 тижнів. Показано, що бактеріальний комплекс прискорює процес компостування органічної складової твердих побутових відходів в 3,3 рази за термофільного режиму та в 2,1 рази за мезофільних умов проведення процесу компостування, що свідчить про ефективність його використання в процесах переробки твердих побутових відходів з метою підвищення загального рівня екологічної безпеки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Koloskov, V. Identification of significant indicators for environmental reserve criterion of territories adjoined to wastes storage places based // *Техногенно-екологічна безпека*. 2018. Випуск 3(1/2018). С. 44–51. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1182841>.
2. Vambol, V., Rashkevich, N. Analysis of methods of identification of ecologically danger substances in atmospheric air // *Техногенно-екологічна безпека*. 2017. Випуск 2. 73–78. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1182894>.
3. Adani F., Tambone F., Gotti A. Biostabilization of municipal solid waste // *Waste Management*. 2004. Vol. 24(8). P. 775–783. doi: 10.1016/j.wasman.2004.03.007.
4. Jouraiphy A. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation composting of sewage sludge and green plant waste // *International biodeterioration and biodegradation*. 2005. Vol. 56. P. 101–108. doi: 10.1016/j.ibiod.2005.06.002.
5. Павленко С. І. Аналіз і обґрунтування технологічних процесів компостування сільськогосподарських органічних відходів тваринного походження // *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2011. № 9(2). С. 94–104. <http://econjournal.vsau.org/files/pdfa/172.pdf>.
6. Yong Xiao, Guang-Ming Zeng, Zhao-Hui Yang. Continuous thermophilic composting (CTC) for rapid biodegradation and maturation of organic municipal solid waste // *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100(20). P. 4807–4813. doi: 10.1016/j.biortech.2009.05.013.

7. Пат. на корисну модель №100991 Україна. С02F 7/00 Спосіб компостування органічних відходів / Шацький В.В., Поволоцький А.А.; власник Запорізький НДЦ з механізації тваринництва ННЦ "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства" НААН України. – u 2014 13758; Заявл. 22.12.2014; опубл. 25.08.2015. Бюл. № 16.

8. Kulcu R., Yaldiz O. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes // *Bioresource Technology*. 2004. Vol. 93. P. 49–57. doi: 10.1016/j.biortech.2003.10.007.

9. Pedra F. Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on mineralization of soil organic matter // *Soil biology and biochemistry*. 2007. Vol. 39(6). P. 1375–1382.

10. Гаценко М. В. Компостування органічної речовини. Мікробіологічні аспекти // Сільськогосподарська мікробіологія. 2014. № 19(1). С. 11–20. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smik\\_2014\\_19\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smik_2014_19_3).

11. Лінник М. Г., Семчук М. М. Технології і технічні засоби виробництва та використання органічних добрив. Ніжин, 2012. 244 с.

12. Ляшенко О. О., Мовсесов Г. Є. Технологія та устаткування прискореного компостування органічних відходів // *Сотрудничество для решения проблемы отходов: материалы III Міжнар. конф.*, 7–8 лют. 2006 р. С. 88–89. <https://www.waste.com.ua/cooperation/2006/theses/lyashenko.html>.

13. Шацький В. В., Поволоцький А. А. Основні вимоги до процесу та біотехнічної системи компостування органічної сировини // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. № 157. С. 140–146. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg\\_2015\\_157\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_157_26).

14. Fierer N., Jackson R.B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities // *PNAS*. 2006. Vol. 103(3). P. 626–631. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16407148>.

15. Castaldi P., Alberti G., Merella R., Melis P. Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity // *Waste Management*. 2005. Vol. 25(2). P. 209–213. doi: 10.1016/j.wasman.2004.12.011.

16. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2005. 608 с.

17. Harrison B.I. Seed deterioration in relation to storage conditions and its influence upon seed germination, chromosomal damage and plant performance // *J. nat. Inst. Agric. Bot.* 1966. Vol. 10. P. 644–633.

18. Самофалова И.А. Лабораторно-практические занятия по химическому анализу почв: учеб. пособие. Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2013. 133 с. <http://pgsha.ru:8008/books/study.pdf>.

19. Tognetti C., Mazzarino M.J., Laos F. Improving the quality of municipal organic waste compost // *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98. P. 1067–1076. doi: 10.1016/j.biortech.2006.04.025.

*Надійшло: 29 березня 2018 р.*

*Прийнято: 3 травня 2018 р.*

**O. Sagdeeva, G. Krusir, A. Tsykalo, H. Leuenberger**

#### **RESEARCH OF COMPOSTING PROCESSES OF SOLID DOMESTIC WASTES' FOOD COMPOSITION**

Solid domestic waste management in Ukraine remains one of the most urgent tasks in the field of environmental safety. Since 40 % of solid domestic waste refers to organic waste that decomposes easily, the removal of this part of waste from landfills, their composting and transformation into a secondary material resource will significantly reduce the environmental burden from existing and planned landfills. Aerobic composting is one of the best available technologies for an integrated waste management system by minimizing anthropogenic impact on the environment, compliance with the latest domestic and foreign developments, economic and practical acceptance of technology. The purpose of the pilot study is to study the possibility of accelerating the process of composting the food component of solid municipal waste by introducing microbiological additives for introduction as a nature protection technology in landfills. The article presents the results of the study of the influence of a microbiological additive on the process of composting the food component of solid household wastes in order to accelerate it in the mesophilic and thermophilic temperature regimes with controlled parameters. To improve the efficiency of the process of composting and to compare the characteristics of the processes as inoculum, the soil was used, as a microbiological additive - an extract from the soil. It has been shown that the microbiological complex of the process of composting the food component of a solid household waste by 3.3 times for the thermophilic regime and 2.1 times for the mesophilic conditions of the composting process, which testifies to the efficiency of its use in the processes of processing solid household waste in order to improve the general level of environmental safety.

**Keywords:** composting, waste, composted mixture, microbiological additive, mesophilic and thermophilic regimes.

#### **REFERENCES**

1. Koloskov, V. (2018). Identification of significant indicators for environmental reserve criterion of territories adjoined to wastes storage places based. *Naukovo-tekhnichnyy Zhurnal «Tekhnogenno-ekologichna bezpeka»*, 3(1/2018), 44–51. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1182841>.

2. Vambol, V, Rashkevich, N. (2017). Analysis of methods of identification of ecologically danger substances in atmospheric air. *Naukovo-tekhnichnyy Zhurnal «Tekhnogenno-ekologichna bezpeka»*, 2, 73–78. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1182894>.

3. Adani, F., Tambone, F., & Gotti, A. (2004). Biostabilization of municipal solid waste. *Waste Management*, 24(8), 775–783. doi: 10.1016/j.wasman.2004.03.007.



4. Jouraiphy, A. (2005). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation composting of sewage sludge and green plant waste. *International biodeterioration and biodegradation*, 56, 101–108. doi: 10.1016/j.ibiod.2005.06.002.
5. Pavlenko, S. I. (2011). Analiz i obgruntuvannya tekhnolohichnykh protsesiv kompostuvannya sil'skohospodars'kykh orhanichnykh vidkhodiv tvarynnoho pokhodzhennya. *Zbirnyk naukovykh prats' Vinnyts'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu*, 9(2), 94–104. <http://econjournal.vsau.org/files/pdfa/172.pdf>.
6. Yong, Xiao, Guang-Ming, Zeng, & Zhao-Hui, Yang. (2009). Continuous thermophilic composting (CTC) for rapid biodegradation and maturation of organic municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 100(20), 4807–4813. doi: 10.1016/j.biortech.2009.05.013.
7. Shatsky, V. V., & Povolotsky, A. A. (2015). Method of Composting of Organic Waste. Patent for Utility Model No. 100991 Ukraine. C02F 7/00. u 2014 13758. Declared 22.12.2014; Published August 25, 2015, Bull No. 16
8. Kulcu, R., & Yaldiz, O. (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 93, 49–57. doi: 10.1016/j.biortech.2003.10.007.
9. Pedra, F. (2007). Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on mineralization of soil organic matter. *Soil biology and biochemistry*, 39(6), 1375–1382.
10. Hatsenko, M. V. (2014). Kompostuvannya orhanichnoyi rechovyny. *Mikrobiolohichni aspekty. Sil'skohospodars'ka mikrobiolohiya*, 19(1), 11–20. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smik\\_2014\\_19\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smik_2014_19_3).
11. Linnyk, M. H., & Semchuk, M. M. (2012). *Tekhnolohiyi i tekhnichni zasoby vyrobnytstva ta vykorystannya orhanichnykh dobryv*. Nizhyn, 244 s.
12. Lyashenko, O. O., & Movsesov, H. YE. (2006). *Tekhnolohiya ta ustatkuvannya pryskorenoho kompostuvannya orhanichnykh vidkhodiv. Sotrudnychestvo dlya reshenyya problemy otkhodov: materialy III Mizhnar. konf., 7–8 lyut. r. S. 88–89*. <https://www.waste.com.ua/cooperation/2006/theses/lyashenko.html>.
13. Shats'ky, V. V., & Povolots'ky, A. A. (2015). Osnovni vymohy do protsesu ta biotekhnichnoyi systemy kompostuvannya orhanichnoyi syrovyny. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 157, 140–146. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdusg\\_2015\\_157\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdusg_2015_157_26).
14. Fierer, N., & Jackson, R. B. (2006). The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *PNAS*, 103(3), 626–631. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16407148>.
15. Castaldi, P., Alberti, G., Merella, R., & Melis, P. (2005). Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Management*, 25(2), 209–213. doi: 10.1016/j.wasman.2004.12.011.
16. Netrusov, A. I. (2005). *Praktikum po mikrobiologii: uchebnoye posobiye dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy*. M.: Akademiya, 608 s.
17. Harrison, B. I. (1966). Seed deterioration in relation to storage conditions and its influence upon seed germination, chromosomal damage and plant performance. *J. nat. Inst. Agric. Bot*, 10, 644–633.
18. Samofalova, I. A. (2013). *Laboratory and practical classes on chemical soil analysis: Textbook*. allowance. Perm: Publishing house of the PermStateAgriculturalAcademy, 133 p. <http://pgsha.ru:8008/books/study.pdf>.
19. Tognetti, C., Mazzarino, M. J., & Laos, F. (2007). Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresource Technology*, 98, 1067–1076. doi: 10.1016/j.biortech.2006.04.025.

Received: 29 March 2018

Accepted: 3 May 2018

**О. А. Сагдеева, Г. В. Крусир, А. Л. Цыкало, Г. Лойенбергер**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМПОСТИРОВАНИЯ ПИЩЕВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Управление твердыми бытовыми отходами в Украине остается одной из наиболее актуальных задач в области экологической безопасности. Поскольку 40% твердых бытовых отходов относятся к органическим отходам, которые легко разлагаются, удаление этой части отходов с мусорных свалок, их компостирование и превращение в вторичный материальный ресурс значительно сократят экологическое бремя от существующих и планируемых полигонов. Аэробное компостирование – одна из лучших доступных технологий для интегрированной системы управления отходами, сводя к минимуму антропогенное воздействие на окружающую среду, соблюдение последних внутренних и зарубежных разработок, экономическое и практическое принятие технологий. Цель экспериментального исследования – изучить возможность ускорения процесса компостирования пищевого компонента твердых бытовых отходов путем внедрения микробиологических добавок для внедрения в качестве природоохранной технологии на полигонах. В статье представлены результаты исследования влияния микробиологической добавки на процесс компостирования пищевого компонента твердых бытовых отходов с целью ускорения его в мезофильных и термофильных температурных режимах с контролируемыми параметрами. Для повышения эффективности процесса компостирования и для сравнения характеристик процессов в качестве инокулята почва использовалась в качестве микробиологической добавки - экстракта из почвы. Было показано, что микробиологический комплекс процесса компостирования пищевого компонента твердых бытовых отходов в 3,3 раза для термофильного режима и 2,1 раза для мезофильных условий процесса компостирования, что свидетельствует об эффективности его использования в процессах переработки твердых бытовых отходов в целях повышения общего уровня экологической безопасности.

**Ключевые слова:** компостирование, отходы, компостная смесь, микробиологическая добавка, мезофильные и термофильные режимы.