

Дата подачі: 06.04.2021

Дата прийняття:

УДК 662.659

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.230211

## Визначення теплового режиму процесу компостування біосировини в камері обертового типу

Г. А. Голуб, І. Г. Грабар, Д. А. Дерев'янюк, А. А. Голубенко,  
О. В. Медведський, В. В. Чуба, О. О. Соларьов, Т. О. Білько,  
М. Ю. Павленко, А. В. Саєнко

Одним з перспективних методів утилізації сільськогосподарської біосировини є виробництво компостів шляхом аеробної ферментації в обертових камерах. Висока ефективність процесу компостування досягається при умові забезпечення належного температурного режиму на кожній з фаз процесу. Зміни температури напряму пов'язані з ефективністю трансформації мікроорганізмами органічних субстратів і є причиною низької якості виробленого компосту за агрохімічними та мікробіологічними показниками.

Встановлено, що високий температурний режим досягається при умові, що кількість теплоти, виділена під час біодеградації сировини мікроорганізмами, є більшою за втрати теплоти, пов'язані з аерацією та поверхневим охолодженням субстрату. Тому час, упродовж якого ферментована маса буде залишатися розігрітою, цілком залежить від фізико-хімічних характеристик субстрату, параметрів обладнання та режимів його функціонування.

Для опису встановлених умов, виходячи з рівняння теплового балансу, створено математичну модель. Модель поєднує теплові витрати, необхідні для підтримання оптимального температурного режиму процесу з вологістю і питомим активним тепловиділенням субстрату, а також з важливим теплофізичним параметром камери – коефіцієнтом теплопередачі матеріалу стінки.

Для проведення досліджень теплового режиму процесу компостування біосировини виготовлено обертову камеру. Експериментально встановлено: при коефіцієнті теплопередачі стінки камери  $1,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , величині питомого активного тепловиділення субстрату  $9,2 \text{ Вт}/\text{кг}$  вологістю  $58 \%$  забезпечуються теплові потреби на процес з виділенням  $140 \text{ МДж}$  надлишкової теплоти.

Дослідження можуть бути покладені в основу осучасненої методології теплових розрахунків процесу компостування біосировини в закритих камерах ферментації.

Ключові слова: коефіцієнт теплопередачі, питоме активне тепловиділення, субстрат, компостування, ферментація, обертова камера.

### 1. Вступ

Сучасне органічне аграрне виробництво є цілісною системою, яка сприяє розвитку біорізномаяття в агроєкосистемах та забезпечує підвищення біологіч-

ної активності ґрунтів. Органічне виробництво базується на використанні природних ресурсів, тобто мінеральних продуктів і продуктів рослинного походження (органічних речовин) та на відмові від синтетичних добрив та пестицидів [1]. Ефективним методом переробки органічних речовин і виробництва органічних добрив є процес компостування.

Компостування – це аеробний процес біологічного розкладання органічних речовин з утворенням компосту, вуглекислого газу, води та теплоти [2].

Ефективність процесу компостування значною мірою залежить від забезпечення належного температурного режиму на кожній з його фаз. На лаг-фазі температура повинна рости від температури оточуючого середовища до 20 °С, на мезофільній – від 20 °С до 42 °С, на термофільній – від 42 °С до 65...70 °С та на фазі дозрівання падати від 65...70 °С до температури оточуючого середовища [3].

Підвищення ефективності процесу компостування біосировини досягається оптимізацією конструкційно-технологічних параметрів процесу [2, 4] відповідно до фізико-хімічних властивостей вихідного субстрату [5, 6] з дотриманням мікробіотичних показників виробленого компосту [7, 8].

Оптимізація конструкційно-технологічних параметрів процесу передбачає розробку або удосконалення базових вузлів та робочих органів обладнання (камер або барабанів обертового типу, змішувачів, модулів завантаження/вивантаження компосту), ефективного використання аерації повітрям. Також для забезпечення оптимального температурного режиму в біореакторі в процесі компостування використовують теплоту, отриману з додаткових джерел енергії [9, 10]. Зазначене виконується з врахуванням фізико-хімічних властивостей вихідного субстрату: вологості, вмісту вуглецю та азоту, кислотності, пористості, розміру частинок тощо. Залежно від співвідношення С:N в компості домінує відповідна еколого-трофічна група мікроорганізмів.

Дієвим методом раціональної організації належного температурного режиму процесу компостування є складання теплового балансу процесу з подальшим визначенням складових надходження і втрат теплоти. Це дозволяє визначити ту кількість теплоти яку потрібно підвести або відвести від реактора для досягнення оптимальної температури на кожній з фаз компостування [11].

Вирішення даного питання вимагає розробки відповідних технічних засобів та обґрунтування технічних та технологічних параметрів процесу.

## **2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

Аналіз сучасних досліджень [2, 4, 8] роботи закритих камер ферментації для здійснення технологічного процесу компостування біосировини свідчить про наявність достатньої кількості публікацій, присвячених режимам та мікробіологічним параметрам даного процесу. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з тепловими процесами, які протікають під час компостування біосировини. Враховуючи, що витрати на нагрівання та охолодження спричиняють суттєвий вплив на економічну складову виробництва компостів, то для установок невеликого об'єму дане питання є актуальним та потребує додаткового дослідження.

Температура субстрату є одним з ключових параметрів аеробної твердофазної ферментації [11, 12]. Зміни температури напряму пов'язані з ефективністю трансформації мікроорганізмами органічних субстратів, які є основою суміші, що ферментується. Аналізуючи температурні дані можна говорити не лише про ефективність та швидкість процесу, але й прогнозувати якість виробленого компосту. Для здійснення температурного моніторингу слід враховувати, що маса, яка компостується, характеризується нерівномірним розподілом теплоти в об'ємі. Теплові процеси в закритих камерах залежать від їх геометричних та конструкційних параметрів, властивостей використаних матеріалів, режиму аерації, фізико-хімічних параметрів субстрату та їх флуктуацій. Тому встановлення ступеню впливу зазначених параметрів на процес компостування дозволить не лише підвищити його ефективність, але й скоротити витрати енергії на процес та забезпечити високу якість готового продукту.

В дослідженні [13] в якості керованих параметрів, які впливають на значення якісного показника процесу компостування (час перебування субстрату в реакторі, з яким пов'язані теплові та енергетичні витрати на процес) виступає режим аерації субстрату. Режим аерації залежить від температури і швидкості потоку повітря, часу аерації та інтервалу обертання барабану. Фізико-хімічні характеристики сировини, такі як відношення вуглецю до азоту, вологість, кислотність, пористість та розмір частинок компонентів у субстраті прийнято сталими параметрами. Ключовим показником, який характеризував процес біоферментації, була температура ферментації, яка досягала 67 °C на термофільній фазі. Математична модель, представлена в [13], ставить за мету скорочення енерговитрат в процесі біоферментації органічних відходів в установці зі сталими конструкційними параметрами, не розглядаючи при цьому установки закритого типу в цілому. Також, якщо в математичну модель вводити фізико-хімічні властивості сировини як сталий параметр, така модель матиме суттєву розбіжність з експериментальними даними. Відомо, що зміна вологості та величини питомого активного тепловиділення субстрату (які залежить від його хімічного складу) спричинятиме зміни температури на всіх фазах процесу ферментації, отже, і на час перебування субстрату в реакторі та витрати енергії на процес.

Авторами роботи [14, 15] представлено модель процесу ферментації, яка пов'язує одночасне перенесення повітря, теплоти та вологи, що є неминучим при екзотермічних процесах переробки органічних матеріалів, з втратами теплоти в навколишнє середовище. В якості критерію оптимізації запропоновано скорочення втрат теплоти, яка виділяється установкою в процесі ферментації. Дана модель функціонування біоферментатора в якості цільової функції передбачає кількість теплоти, яка виділяється в процесі саморозігрівання субстрату, що переробляється. Однак визначення запропонованої функції в явному вигляді аналітичним шляхом не є можливим. За допомогою представленої моделі можна вирішити лише певні конкретні практичні задачі в стаціонарному режимі, які характеризують динамічну рівновагу системи.

В роботі [16] тепловий режим процесу ферментації досліджувався в умовах постійно змінних впливів, які формують якість кінцевого виробленого продукту. В реальних умовах функціонування тепловий режим процесу фермента-

ції можна описати сукупністю змінних, які є векторною функцією, і визначають якісне виконання процесу в часі. На біоферментаційну установку діють зовнішні фактори, які утворюють вектор-функцію збурень і намагаються порушити бажане протікання процесу. До таких збурень відносяться режим аерації, зміна фізико-хімічних параметрів субстрату в часі (вологості, рН, відношення C:N) тощо. В якості вихідної змінної розглядається будь-який з випадкових параметрів, що характеризує якісний показник протікання процесу ферментації в біореакторі або їх сукупність. Такими показниками є – зміна температури і швидкості саморозігрівання суміші в часі, зміна теплового режиму процесу, зміна якісних показників субстрату, що компостується, тощо. Однак представлена модель виключає важливий фактор впливу на установку – можливість обертання біосировини в процесі ферментації для забезпечення однорідності структури та додаткової аерації повітрям.

Аналіз [11–16] свідчить, що розуміння та вивчення явищ продукування та передачі енергії в процесі компостування є важливим параметром контролю, управління та оптимізації процесів компостування.

У наявній літературі представлена обмежена кількість праць, присвячених вивченню енергетичного режиму процесу компостування. Як правило, або розглядаються установки стаціонарного типу, або наведено дані лише питомого активного тепловиділення субстрату на основі різних видів біосировини.

В роботах [17, 18] наведені значення питомого активного тепловиділення для різних субстратів. Зокрема, високі значення питомого активного тепловиділення притаманні субстратам на основі соломи (17,06 МДж/кг органічної частини субстрату), пташиного посліду (12,8 МДж/кг органічної частини субстрату). Дещо нижчі значення даного показника характерні для субстратів на основі промислового мулу, зелених відходів, стічних вод та рідких відходів (7...10 МДж/кг деградованої органічної речовини). Найнижчі значення питомого активного тепловиділення мають комунальні відходи – 1,136 МДж/кг деградованої речовини. Автори зазначають, що знаючи величину питомого активного тепловиділення речовини, можна програмувати даний параметр, створювати багатокомпонентні субстрати. Так, наприклад, значення питомого активного тепловиділення субстрату на основі суміші з підстилкового гною ВРХ, пташиного посліду та деревної стружки може становити від 17 до 20 МДж/кг легкої твердої частини.

Отже, знаючи величину питомого активного тепловиділення субстрату можна, виходячи з конструкційних параметрів установки, забезпечити відповідний режим аерації, при якому температура процесу досягатиме максимальних значень вже на 3–4 добу. Вказане сприятиме скороченню терміну компостування та економії енерговитрат на процес. Хоча дослідження [17, 18] і висвітлювали питання виділення теплоти в процесі компостування в стаціонарних установках, однак питання втрат теплоти в процесі компостування не розглядалося.

Дані питання вивчалися в робота [19, 20]. За дослідженнями [20] для лабораторних установок найвищі втрати теплоти спостерігалися через зовнішні стінки обладнання, тоді як для установок комерційного типу найвищі втрати теплоти були пов'язані з випаровування води з субстрату. За [19] втрати теплоти

від бічних стінок ферментаційних камер є найвищими і залежно від ефективності теплоізоляційних матеріалів можуть становити 30...90 % від загальної кількості теплоти процесу.

В [21] виконано енергетичний аналіз процесу компостування рослинних залишків томатів в реакторі барабанного типу. Авторами зазначено, що загальна теплопродуктивність процесу компостування становила 1,9 МДж/кг органічної частини субстрату і лише 4 % від вказаної теплоти було використано на забезпечення теплових потреб процесу. Близько 96 % від виробленої кількості теплоти склали теплові втрати: 1 % – втрати з тепловим випромінюванням; 2 % – з аерацією; 69 % та 28 % – відповідно втрати через циліндричні бічні та торцеві стінки реактора.

В роботах [19–21] досліджено лише теплові втрати в процесі компостування і дано загальні рекомендації щодо їх мінімізації. Отримана інформація є актуальною при проектуванні, керуванні та контролі процесу виробництва компостів з метою підвищення ефективності біореактора та продуктивності процесу загалом. Однак автори не визначали, яку кількість «балансової теплоти» потрібно підвести до реактору для забезпечення оптимального температурного режиму упродовж процесу компостування, залежно від фізико-хімічного складу субстрату, режиму аерації та температури навколишнього середовища.

За дослідженнями [22, 23] швидкість процесу аеробної твердофазної ферментації та досягнення її термофільної стадії в значній ступені залежать від вихідної вологості субстрату. Вода необхідна для транспортування мікробних клітин та обумовлює їх здатність утворювати колонії.

Вважається, що вершина активності аеробних мікроорганізмів досягається при такій максимальній вологості субстрату, яка не перешкоджає дифузії кисню через шар води до частинок субстрату. В роботах досліджено вплив зміни вологості на життєдіяльність мікробіоти компосту та на темпи біодеградації органічної складової субстрату. Однак не досліджено вплив вологості на показник питомого активного тепловиділення субстрату та на кількість теплоти, яку потрібно підвести до реактора для забезпечення оптимального температурного режиму процесу.

Більша частина досліджень теплових процесів під час аеробної твердофазної ферментації субстратів, стосуються ферментаційних установок стаціонарного типу, або з періодичним обертанням. Дослідження, пов'язані з тепловими процесами ферментаційних установок закритого типу з постійним обертанням реакторів, все ще відсутні. Такі дослідження є важливими як для забезпечення оптимального температурного режиму, так і для досліджень процесів випаровування вологи в процесі компостування, особливо щодо субстратів з початковим низьким вмістом вологи 40...45 %. Крім того, кількісна оцінка енергетичних параметрів процесу компостування в обертових реакторах барабанного типу необхідна для зменшення втрат тепла та збільшення швидкості виробництва компосту упродовж короткого часу.

З огляду на зазначене, виникає потреба у дослідженні теплових процесів, які протікають в ферментаційних камерах з постійним циклом обертання зале-

жно від фізико-хімічних властивостей субстрату та конструкційно-технологічних параметрів процесу.

### 3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є встановлення залежності кількості теплоти, необхідної для забезпечення оптимального температурного режиму процесу компостування, від вологості і питомого активного тепловиділення субстрату та коефіцієнту теплопередачі стінки обертової камери. Зазначене дозволить підвищити ефективність процесу виробництва компостів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати такі завдання:

- скласти тепловий баланс у системі;
- експериментально дослідити вплив вологості і питомого активного тепловиділення субстрату та коефіцієнту теплопередачі стінки камери на кількість теплоти, необхідну для забезпечення оптимального температурного режиму процесу компостування.

### 4. Матеріали та методи дослідження

Для проведення експериментальних досліджень теплового забезпечення процесу виробництва компостів розроблено та виготовлено експериментальну камеру обертового типу (рис. 1).

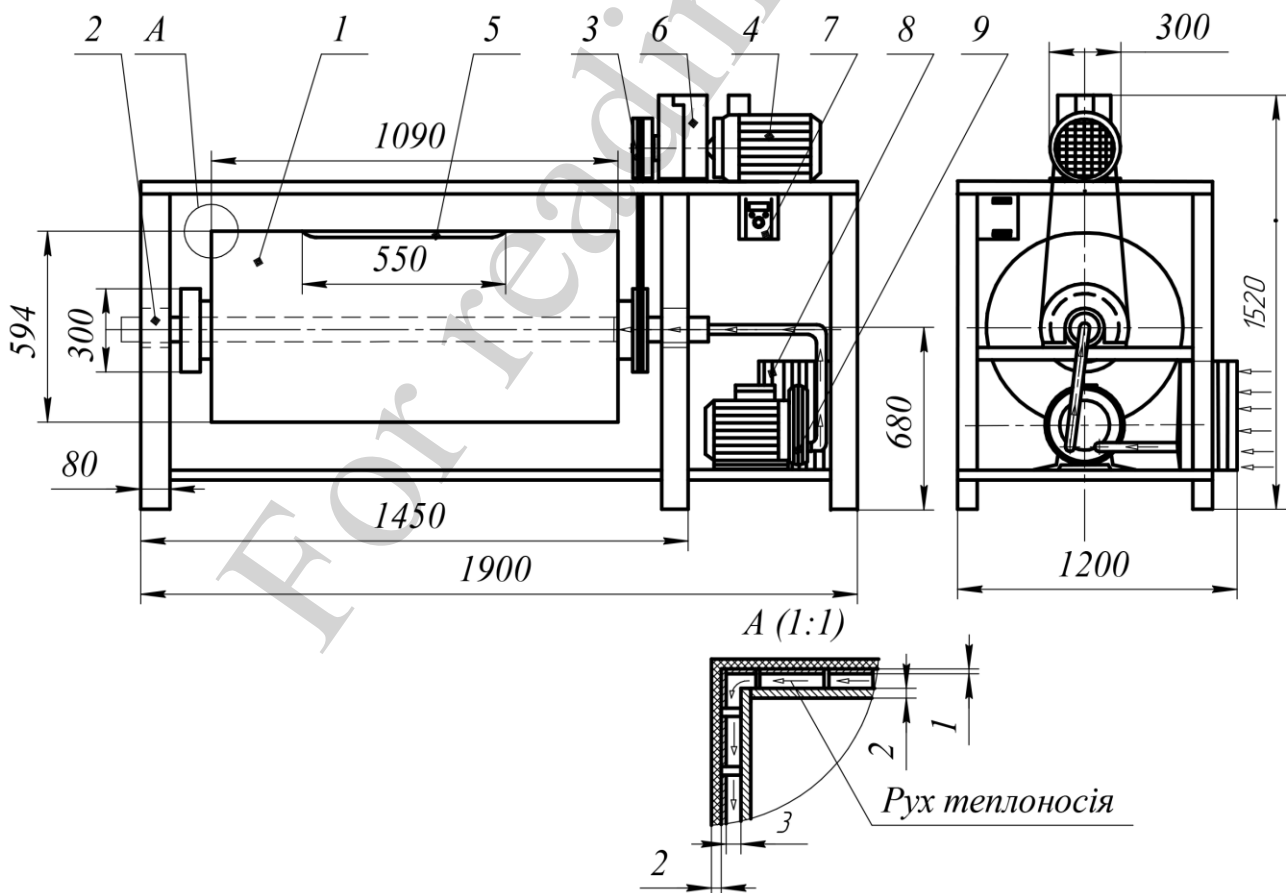


Рис. 1. Схематичне зображення експериментальної камери обертового типу

Обертова камера (об'ємом 300 л) складалася з барабана 1, пасової передачі 3, електродвигуна 4 з частотним регулятором 7, повітряного компресора 9, теплообмінника 8, редуктора 6 та люка 5 для завантаження субстрату та вивантаження готового компосту. Всі вузли установки було змонтовано на рамі 2. Для рівномірного обігрівання стінка камери по периметру була виконана подвійною. Між двома металевими шарами стінки розташовано кожух, по якому рухається теплоносій, підготовлений в теплообміннику. В якості теплоносія слугувало повітря. Залежно від пори року підігріте (охолоджене) повітря використовувалося для підтримання оптимального температурного режиму в реакційній зоні субстрату. Вказаний технічний прийом дав змогу уникнути небажаного охолодження (перегрівання) субстрату внаслідок дії зовнішніх факторів (мороз, прямі сонячні промені тощо).

Завантаження субстрату та вивантаження компосту відбувалося періодично. Коефіцієнт заповнення барабану камери субстратом становив 0,4...0,6. Барабан являв собою сталеву бочку з внутрішнім діаметром 590 мм, довжиною 1090 мм та товщиною стінки 2 мм. Внутрішня сторона люка 5 була оснащена гумовим ущільнювачем для забезпечення герметичності конструкції. Також люк 5 обладнано автоматичним клапаном регулювання тиску, який відкривався при зростанні тиску понад 2 атм. Барабан постійно обертася навколо нерухомої горизонтальної вісі (сталева труба  $\varnothing 60$  мм) з частотою 5 об/хв за допомогою електродвигуна 4 потужністю 0,25 кВт (модель АИР71В8, Україна) з частотним регулятором 7. Сталева труба, що слугувала віссю, зі сторони правого фланця барабана містила заглушку. Зазначений конструктивний прийом дозволив реалізовувати подачу повітря для аерації субстрату, а також через отвори подавати теплоносій в простір між шарами стінки барабану для забезпечення теплової регуляції процесу.

Для здійснення аерації субстрату частина сталевої труби, яка знаходилася в обертальному барабані камери, містила наскрізні отвори з встановленими форсунками, рівномірно розподіленими по периметру труби.

Повітря для аерації субстрату безперервно подавалося зі швидкістю потоку  $5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/хв з повітряного ресивера (тиск 1 МПа, об'єм 0,22 м<sup>3</sup>), підключеного до повітряного компресора 9 (модель FORTE ZA 65-100, енергоємність 1,5 кВт, Китай). З резервуара до форсунок повітря надходило через регулятор витрат з можливістю регулювання швидкості потоку повітря в межах від  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $25 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/хв. Продуктивність системи подачі повітря налаштовано таким чином, щоб, за умови неспрацьовування зворотного клапану в завантажувальному люці 5 барабана 1, відношення кількості повітря до субстрату становило 4:1.

Теплообмінник 8 слугував для формування теплоти, яку необхідно підвести до субстрату для підтримання теплового режиму процесу компостування, або для утилізації надлишкової теплоти, виділеної в процесі компостування.

Дослідження проводилося для трьох різних за складом видів субстрату з різним питомим активним тепловиділенням. Для приготування субстратів було використано торф, підстилковий гній ВРХ, курячий послід, солону пшениці та деревну стружку з середнім розміром частинок 0,9 см. Солону попередньо висушували до вологості 45 % та подрібнювали за допомогою механічного подрі-

бнювача (модель Shredder FYS-76, Китай). Довжина частинок компонентів у суміші для субстрату не перевищувала 1 см. Подрібнення сировини сприяло кращій аерації субстрату, а зменшення розміру частинок до 0,9 см забезпечило посилення процесу мікробної деградації. Далі подрібнені компоненти суміші повторно висушували до вологості 20 %.

Наступним кроком було приготування субстратів.

Субстрат № 1 складався з 45 % торфу, 40 % підстилкового гною, 15 % курячого посліду (азот  $N_{\text{заг}}=2,22$  %;  $P_2O_5=1,99$  %;  $K_2O=1,58$  %;  $pH=6,1$ ; зольність – 12,87 %; клітковина – 20,85 %; жир – 2,88 % та триптофан – 0,26 %).

Субстрат № 2 складався з 40 % торфу, 35 % підстилкового гною, 15 % курячого посліду та 10 % деревної стружки (азот  $N_{\text{заг}}=1,51$  %;  $P_2O_5=1,3$  %;  $K_2O=1,17$  %;  $pH=5,6$ ; зольність – 11,04 %; клітковина – 25,13 %; жир – 2,16 % та триптофан – 0,17 %).

Субстрат № 3 складався з 35 % торфу, 35 % підстилкового гною, 15 % курячого посліду та 15 % січки соломи (азот  $N_{\text{заг}}=2,07$  %;  $P_2O_5=1,49$  %;  $K_2O=0,86$  %;  $pH=6,3$ ; зольність – 11,44 %; клітковина – 20,38 %; жир – 2,5 % та триптофан – 0,26 %). Для субстратів № 1–3 усі значення наведено у % на абсолютно суху речовину.

В дослідженнях розглядалася активна фаза процесу компостування, тобто мезофільна та термофільна фази.

Дослідження витрат теплоти  $Q_d$ , необхідних для підтримання температурного режиму процесу компостування, реалізовано шляхом виконання багатofакторного експерименту. Змінними факторами експерименту були вологість субстрату  $W$ , питома активне тепловиділення субстрату  $q$  та коефіцієнт опору теплопередачі стінки барабану камери  $k$ .

Для досліджень обрано діапазон вологості субстратів від 45 до 75 %. При значеннях вологості відмінних від вказаного діапазону, активність мікроорганізмів суттєво знижується [3, 23].

Питома активне тепловиділення субстрату залежить від фізико-хімічних характеристик субстрату –  $pH$ , відношення вуглецю до азоту, вмісту целюлозно-лігнінових компонентів, кислотності, розміру частинок компонентів. Значення питомого активного тепловиділення для субстратів № 1, № 2 та № 3 були визначені експериментальним шляхом. Дослідження виконувалися в закритому приміщенні невеликого об'єму з температурою навколишнього середовища 18 °С, вологістю 60 % та швидкістю руху повітря до 0,1 м/с. Для субстрату № 1 значення питомого активного тепловиділення приблизно становило  $q=5,2$  Вт/кг, для субстрату № 2 –  $q=7,2$  Вт/кг та для субстрату № 3 –  $q=9,2$  Вт/кг.

Спочатку вологість субстратів № 1–3 було доведено до 45 %. В барабан камери з відсутньою теплоізоляцією зовнішніх стінок завантажено субстрат № 1 та виконано дослідження теплових витрат на підтримання процесу компостування. Подібне дослідження було виконано для субстратів № 2 та № 3. Наступним кроком вологість субстратів було доведено до 60 % і дослідження повторювалися. Далі дослідження виконували для субстратів вологістю 75 %.

З метою встановлення впливу втрат теплоти в навколишнє середовища на теплові витрати  $Q_d$  в процесі ферментації біомаси, зовнішню поверхню бараба-



на було додатково теплоізолюваною (використано композитний матеріал на основі пінопласту). Товщина шару теплоізоляції змінювалася від 0 до 20 см таким чином, щоб діапазон зміни параметра  $k$  становив від 10 Вт/(м<sup>2</sup>·°C) до 1,6 Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Дослідження виконувалися для значень коефіцієнту теплопередачі  $k$  рівних 1,6; 5,8 та 10 Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Температура субстрату вимірювалася датчиком температури (модель ТСП 1-8, Україна). Частоту обертання барабана реактора вимірювали портативним оптичним тахометром (модель testo 465, Німеччина). Температура навколишнього середовища та відносна вологість повітря вимірювалися за допомогою термогігрометра (модель Walcom НТ-350, Китай). Проби перемішаних компонентів субстрату відбирались трубчатим пробовідбірником в різних точках барабану при знятій кришці на кожному з етапів компостування. Вологість субстрату вимірювалася приладом (модель SUPERTECH AGROLINE, Данія). Маса проби визначалася за допомогою терезів лабораторних (модель FEH-320, Україна). Товщину шару ізоляції вимірювали штангенциркулем механічним 300 мм (SIGMA 3922291, Україна). Одержані результати експериментальних досліджень опрацьовували з застосуванням пакету прикладних програм Microsoft Excel 2003 та Statistica 11.0 (StatSoft, США).

Інтервали варіації факторів: вологість субстрату  $W$  (%) – 45, 60 та 75; коефіцієнт теплопередачі  $k$  (Вт/[м<sup>2</sup>·°C]) – 1,6, 5,8 та 10; питоме активне тепловиділення субстрату  $q$  (Вт/кг) – 5,2, 7,2 та 9,2. Фактори кодування:  $X_1=W$ ,  $X_2=k$ ;  $X_3=q$ . Рівні варіації вище зазначених факторів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Змінні фактори та рівні їх варіацій для визначення витрат теплоти

Рівень варіації фактора	Вологість субстрату $W$ , %	Коефіцієнт теплопередачі стінки камери $k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	Питоме активне тепловиділення субстрату $q$ , Вт/кг
Верхній рівень (+)	75	10,0	9,2
Середній рівень (0)	60	5,8	7,2
Нижній рівень (-)	45	1,6	5,2

Для отримання моделей процесу у вигляді поліномів другого ступеню вибрано некомпозиційний план другого порядку на кубі типу Бокса-Бенкіна. Етап планування передбачав: кодування факторів, рандомізацію проведення дослідів, реалізацію експерименту, перевірку відтворюваності експерименту, розрахунок коефіцієнтів регресії, оцінку значущості коефіцієнтів регресії та адекватності тестової моделі [24].

Для достовірності дослідних даних прийнято, що кількість паралельних дослідів, проведених за однакових умов, рівна 3. Було виконано серію з 8 оригінальних дослідів у відповідності до матриці планування та обраховані коефіцієнти лінійної частини полінома за методикою [24]. Дослідження виконувалися у трикратній повторності. За критерієм Кохрена визначалася однорідність дисперсії в дослідях. У випадку невиконання за критерієм Кохрена умови відтворюваності, перевірялися умови проведення дослідів, в результаті якого отри-

мано максимальне значення дисперсії, а також перевірялася точність вимірювання. Тоді збільшували число повторювань. У випадку виконання за критерієм Кохрена умови відтворюваності складалося рівняння регресії. Розраховувалися дослідні коефіцієнти рівняння, які відображали ступінь впливу змінних факторів експерименту на залежний параметр. Перевірка адекватності отриманого поліному здійснювалася за критерієм Фішера. Значущість кожного коефіцієнту рівняння регресії встановлювалася за критерієм Ст'юдента. Дані дослідів були попередньо статистично оброблені для усунення грубих помилок.

Згідно з планом багатофакторного експерименту отримано значення відносної похибки моделі, яке є меншою за 2,67 %. Це стосується всіх експериментів. Значення середнього відносного відхилення склало 2,2 %. Таким чином, величина відносної похибки була меншою за 10 %. Отримане значення відносної похибки вважається прийнятним при моделюванні [25].

## 5. Результати дослідження теплового режиму процесу компостування біосировини в камері обертового типу

### 5.1. Тепловий баланс у системі

Наукові дослідження [20] свідчать, що з метою підтримання оптимального температурного режиму в процесі компостування (особливо в холодний період року) до барабану камери необхідно підводити додаткову кількість теплоти.

У загальному вигляді рівняння теплового балансу для визначення зазначеної необхідної додаткової кількості теплоти матиме вигляд:

$$Q_d + Q_{\text{суб}} - Q_{\text{от}} - Q_{\text{аер}} - Q_{\text{наг}} = 0, \quad (1)$$

де  $Q_d$  – додаткова кількість теплоти, що передається гарячим теплоносієм субстрату, що компостується, для підтримання оптимального температурного режиму процесу компостування, Вт;

$Q_{\text{суб}}$  – кількість теплоти, що виділяється субстратом упродовж процесу, Вт;

$Q_{\text{наг}}$  – кількість теплоти, необхідна для нагрівання суміші до оптимальної робочої температури процесу компостування, Вт;

$Q_{\text{аер}}$  – кількість теплоти, що втрачається з повітрям під час аерації, Вт.

$Q_{\text{от}}$  – кількість теплоти, що передається з поверхні барабану камери в оточуюче середовище шляхом теплообміну, Вт.

Функціональна залежність між температурою та сумою потоків теплоти у часі визначається диференціальним рівнянням, яке для стаціонарного теплообмінного процесу можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} Q_{\text{наг}} &= (m_{\text{суб}} \cdot c_{\text{суб}} + m_{\text{бар}} \cdot c_{\text{бар}}) \cdot (T_{\text{опт.комп.}} - T_{\text{вх.}}) / d\tau_{\text{ц}} = \\ &= (m_{\text{суб}} \cdot c_{\text{суб}} + m_{\text{бар}} \cdot c_{\text{бар}}) \cdot \frac{dT}{d\tau_{\text{ц}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $m_{\text{суб}}$ ,  $m_{\text{бар}}$  – відповідно маса субстрату та барабану камери, кг;

$c_{\text{суб}}$ ,  $c_{\text{бар}}$  – відповідно питома теплоємність субстрату та матеріалу барабану, Дж/(кг·°С);

$T_{\text{опт.комп.}}$  – оптимальна температура відповідної фази процесу, °С;

$T_{\text{вх}}$  – початкова температура компосту та установки, °С;

$\tau_{\text{ц}}$  – тривалість фази процесу компостування, що досліджується, с.

При збільшенні вологості субстрату питома теплоємність субстрату також зростає. Отже, чим вища вологість субстрату, тим більшу кількість теплоти потрібно підвести до реактора камери для підтримання оптимальної температури процесу. Рівняння, яке встановлює зазначену залежність, має наступний вигляд:

$$c_{\text{суб}} = \left( (m_{\text{суб}} - m_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot c_{\text{тв.ф}} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \right) / m_{\text{суб}}, \quad (3)$$

де  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  – маса води в субстраті, кг;

$c_{\text{H}_2\text{O}}$  – питома теплоємність води, Дж/(кг·°С);

$c_{\text{тв.ф}}$  – питома теплоємність твердої фази субстрату, Дж/(кг·°С).

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = W \cdot (m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{тв.ф}}) / 100 \% = W \cdot m_{\text{суб}} / 100 \%, \quad (4)$$

де  $W$  – вологість субстрату, %.

Тоді рівняння (3) з урахуванням залежності (4) прийме вигляд:

$$c_{\text{суб}} = \left( (m_{\text{суб}} - W \cdot m_{\text{суб}} / 100 \%) \cdot c_{\text{тв.ф}} + \right) / \left( + c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot W \cdot m_{\text{суб}} / 100 \% \right) / m_{\text{суб}} = c_{\text{тв.ф}} + W \cdot (c_{\text{H}_2\text{O}} - c_{\text{тв.ф}}) / 100 \%. \quad (5)$$

Додаткова кількість теплоти, що передається гарячим теплоносієм субстрату для підтримання оптимальної температури на відповідній фазі процесу:

$$Q_{\text{д}} = V_{\text{тн}} \cdot c_{\text{тн}} \cdot \rho_{\text{тн}} (T_{\text{тн.вих}} - T_{\text{тн.вх}}) / d\tau_{\text{ц}}, \quad (6)$$

$c_{\text{тн}}$  – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·°С);

$\rho_{\text{тн}}$  – щільність теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{тн}}$  – об'єм теплоносія, що циркулює в міжстінковому просторі барабану упродовж циклу компостування, м<sup>3</sup>;

$T_{\text{тн.вх}}$  – температура теплоносія на вході в барабан камери;

$T_{\text{тн.вих}}$  – температура теплоносія на виході з барабану камери.

Втрати теплового потоку в навколишнє середовище:

$$Q_{\text{от}} = F \cdot (T_{\text{опт.комп.}} - T_{\text{зовн}}) \cdot k, \quad (7)$$

де  $F$  – площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>.

$$F = \pi \left( D_B + 2 \sum_{i=1}^n h_i \right) \cdot \left( \frac{1}{2} D_B + \sum_{i=1}^n h_i + L \right), \quad (8)$$

$D_B$  – внутрішній діаметр барабану камери, м;

$\sum h_i$  – товщина стінок барабану камери з урахуванням утеплювача, м;

$L$  – довжина барабану камери, м;

$k$  – коефіцієнт теплопередачі стінок барабану камери, Вт/м<sup>2</sup>.

Кількість теплоти, що виділяється субстратом упродовж циклу компостування:

$$Q_{\text{суб}} = m_{\text{суб}} \cdot k_1 \cdot q / d\tau_{\text{ц}}, \quad (9)$$

$q$  – питома тепловиділення субстрату за цикл компостування, Дж/кг;

$k_1$  – коефіцієнт, що враховує частку теплоти, виділену за активну фазу.

Тепловиділення субстрату упродовж циклу компостування є нерівномірним, що пов'язано з життєдіяльністю бактерій та оптимальними умовами для їх існування. Явище саморозігрівання субстрату продовжується доти, доки швидкість виділення теплоти перевищує швидкість її розсіювання. При досягненні певного температурного максимуму життєдіяльність бактерій уповільнюється, а надалі починає спадати, що знижує інтенсивність процесу.

Кількість теплоти, що втрачається з повітрям аерації, становить:

$$Q_{\text{аер}} = c_{\text{пов}} \cdot \rho V_{\text{пов}} (T_{\text{пов.вих}} - T_{\text{пов.вх}}) / d\tau_{\text{ц}}, \quad (10)$$

$c_{\text{пов}}$  – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·°С);

$\rho$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{пов}}$  – об'єм повітря аерації, підведеного за цикл компостування, м<sup>3</sup>;

$T_{\text{пов.вх}}$  – температура повітря аерації на вході в барабан, °С;

$T_{\text{пов.вих}}$  – температура повітря аерації на виході з барабану, °С;

Значення питомої теплоємності повітря при різних значеннях вологості відрізняється. Однак через незначний об'єм повітря вплив питомої теплоємності повітря на точність моделі незначний і ним можна знехтувати.

Підставивши рівняння (2), (6), (7), (9 та (10) в залежність (1) матимемо:

$$\begin{aligned} & V_{\text{тн}} \cdot c_{\text{тн}} \cdot \rho_{\text{тн}} (T_{\text{тн.вих}} - T_{\text{тн.вх}}) / d\tau_{\text{ц}} + \\ & + m_{\text{суб}} \cdot k_1 \cdot q / d\tau_{\text{ц}} - F \cdot (T_{\text{опт.комп.}} - T_{\text{зовн}}) \cdot k - \\ & - c_{\text{пов}} \cdot \rho V_{\text{пов}} (T_{\text{пов.вих}} - T_{\text{пов.вх}}) / d\tau_{\text{ц}} - \\ & - (m_{\text{суб}} c_{\text{суб}} + m_{\text{бар}} c_{\text{бар}}) \cdot \frac{dT}{d\tau_{\text{ц}}} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Звідки

$$\begin{aligned}
& \left( m_{\text{суб}} \left( c_{\text{тв.ф}} + W \cdot \left( c_{\text{H}_2\text{O}} - c_{\text{тв.ф}} \right) / 100 \% \right) + m_{\text{бар}} c_{\text{бар}} \right) \cdot \frac{dT}{d\tau_{\text{ц}}} = \\
& = V_{\text{тн}} \cdot c_{\text{тн}} \cdot \rho_{\text{тн}} \left( T_{\text{тн.вих}} - T_{\text{тн.вх.}} \right)_{\text{ц}} / d\tau_{\text{ц}} + \\
& + m_{\text{суб}} \cdot k_1 \cdot dq / d\tau_{\text{ц}} - F \cdot \left( T_{\text{опт.комп.}} - T_{\text{зовн}} \right) \cdot k - \\
& - c_{\text{пов}} \cdot \rho \cdot V_{\text{пов}} \left( T_{\text{пов.вих}} - T_{\text{пов.вх.}} \right) / d\tau_{\text{ц}}.
\end{aligned} \tag{12}$$

Перетворимо вираз відносно досліджуваного параметру:

$$\begin{aligned}
\frac{dQ_{\text{д}}}{d\tau_{\text{ц}}} & = m_{\text{суб}} \cdot k_1 \cdot \frac{dq}{d\tau_{\text{ц}}} - \\
& - \left( m_{\text{суб}} \left( c_{\text{тв.ф}} + W \cdot \left( c_{\text{H}_2\text{O}} - c_{\text{тв.ф}} \right) / 100 \% \right) + \right. \\
& \left. + m_{\text{бар}} c_{\text{бар}} + c_{\text{пов}} \cdot \rho \cdot V_{\text{пов}} \right) \cdot \frac{dT}{d\tau_{\text{ц}}} - F \cdot k.
\end{aligned} \tag{13}$$

Провівши інтегрування диференційного рівняння (13) за часом матимемо:

$$\begin{aligned}
Q_{\text{д}} & = m_{\text{суб}} \cdot k_1 \cdot q - \\
& - \left( m_{\text{суб}} \left( c_{\text{тв.ф}} + W \cdot \left( c_{\text{H}_2\text{O}} - c_{\text{тв.ф}} \right) / 100 \% \right) + \right. \\
& \left. + m_{\text{бар}} c_{\text{бар}} + c_{\text{пов}} \cdot \rho \cdot V_{\text{пов}} \right) \times \\
& \times \left( T_{\text{опт.комп.}} - T_{\text{зовн}} \right) - F \cdot k \cdot \tau_{\text{ц}}.
\end{aligned} \tag{14}$$

Отримане рівняння пов'язує досліджуваний параметр – додаткову кількість теплоти, необхідну для підтримання процесу компостування, та регульовані параметри – вологість субстрату, коефіцієнти теплопередачі та тепловиділення.

## 5. 2. Результати експериментального дослідження теплового режиму процесу компостування біосировини

В результаті експериментального дослідження та статистичної обробки отримано масив даних значень витрат теплоти, необхідної для підтримання оптимального температурного режиму процесу компостування, які представлено в табл. 2.

В результаті обробки результатів експерименту в програмі Statistica 11.0 (StatSoft, США) було отримано рівняння регресії в закодованому вигляді (15) та визначені відповідні коефіцієнти регресії:  $b_0=72,09$ ;  $b_1=51,43$ ;  $b_2=97,16$ ;  $b_3=-60,73$ ;  $b_{12}=-3,98$ ;  $b_{13}=32,25$ ;  $b_{23}=4,1$ ;  $b_{11}=25,38$ ;  $b_{22}=-0,8$ ;  $b_{33}=12,9$ .

Таблиця 2

## Матриця планування багатofакторного експерименту

№ дос- ліду	Фактори			Результати експериментів				Перевірка адекватності моделі		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Q <sub>д1</sub>	Q <sub>д2</sub>	Q <sub>д3</sub>	Q <sub>д.сер.</sub>	Q <sub>д.ссер.р.</sub>	(Q <sub>д.сер.</sub> - Q <sub>д.ссер.р.</sub> )	(Q <sub>д.сер.</sub> - Q <sub>д.ссер.р.</sub> ) <sup>2</sup>
7	+	+	0	239,5	244,5	240,5	241,5	241,3	0,2	239,5
8	+	-	0	50,7	51,1	50,8	50,9	54,9	-4,0	50,7
12	-	+	0	150,2	149,3	151,8	150,4	146,4	4,0	150,2
10	-	-	0	-56,6	-56,6	-55,2	-56,1	-55,9	-0,2	-56,6
2	0	0	0	73,2	72,8	72,5	72,8	72,1	0,7	73,2
11	+	0	+	135,7	133,6	133,5	134,3	133,3	1,0	135,7
15	+	0	-	192,5	195,3	193,6	193,8	190,3	3,5	192,5
6	-	0	+	-37,6	-37,7	-37,4	-37,6	-34,0	-3,5	-37,6
9	-	0	-	151,0	151,3	150,6	151,0	151,9	-1,0	151,0
3	0	0	0	71,9	72,6	72,7	72,4	72,1	0,3	71,9
5	0	+	+	121,4	123,9	121,9	122,4	124,7	-2,3	121,4
4	0	+	-	232,5	235,7	231,1	233,1	238,0	-4,9	232,5
13	0	-	+	-73,2	-72,9	-72,7	-72,9	-77,8	4,9	-73,2
1	0	-	-	54,0	54,5	54,0	54,2	51,9	2,3	54,0
14	0	0	0	70,8	71,6	70,7	71,0	72,1	-1,1	70,8

Рівняння регресії:

$$\begin{aligned}
 Q_0 = & 72,09 + 51,43 \cdot X_1 + 97,16 \cdot X_2 - 60,73 \cdot X_3 - \\
 & -3,98 \cdot X_1 \cdot X_2 + 32,25 \cdot X_1 \cdot X_3 + 4,1 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\
 & +25,38 \cdot X_1^2 - 0,8 \cdot X_2^2 + 12,9 \cdot X_3^2,
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

де  $Q_0$  – витрати теплоти, необхідної для підтримання оптимального температурного режиму процесу компостування, МДж;

$X_1$  (W) – вологість субстрату, %;

$X_2$  (k) – коефіцієнт теплопередачі стінки камери, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$X_3$  (q) – питома активне тепловиділення субстрату, Вт/кг.

Табличне значення критерію Кохрена при 5 % рівні значущості, числі ступенів свободи рівному  $f_2=2$  та при числі експериментів  $f_1=15$  складає  $G^{\text{табл}}=0,3346$  [24]. Отримано, що  $G=0,276$ . Оскільки  $G < G^{\text{табл}}$ , то процес повністю відтворюється.

Розрахункове значення критерію Фішера при дисперсії неадекватності  $S^2=8,41$  склало  $F=9,5$ . Табличне значення даного параметра становить  $F^{\text{табл}}(0,05; 15; 2)=19,38$ . Оскільки,  $F < F^{\text{табл}}$ , то гіпотеза про адекватність рівняння регресії підтверджується [24]. Коефіцієнт детермінації склав  $R^2=0,98$ .

На підставі аналізу коефіцієнтів рівняння регресії (1) можна зробити висновок, що найбільший вплив на функцію відгуку має коефіцієнт теплопередачі стінки камери  $X_2$  ( $k$ ). Питоме активне тепловиділення субстрату  $X_3$  ( $q$ ) впливає меншою мірою. Найменший вплив чинить вологість субстрату  $X_1$  ( $W$ ). Числове збільшення  $X_1$  та  $X_2$  призводить до зростання функції відгуку, а їх зменшення – до її спадання.

Графічні зображення вище зазначеного рівняння (15) представлені на рис. 2–4.

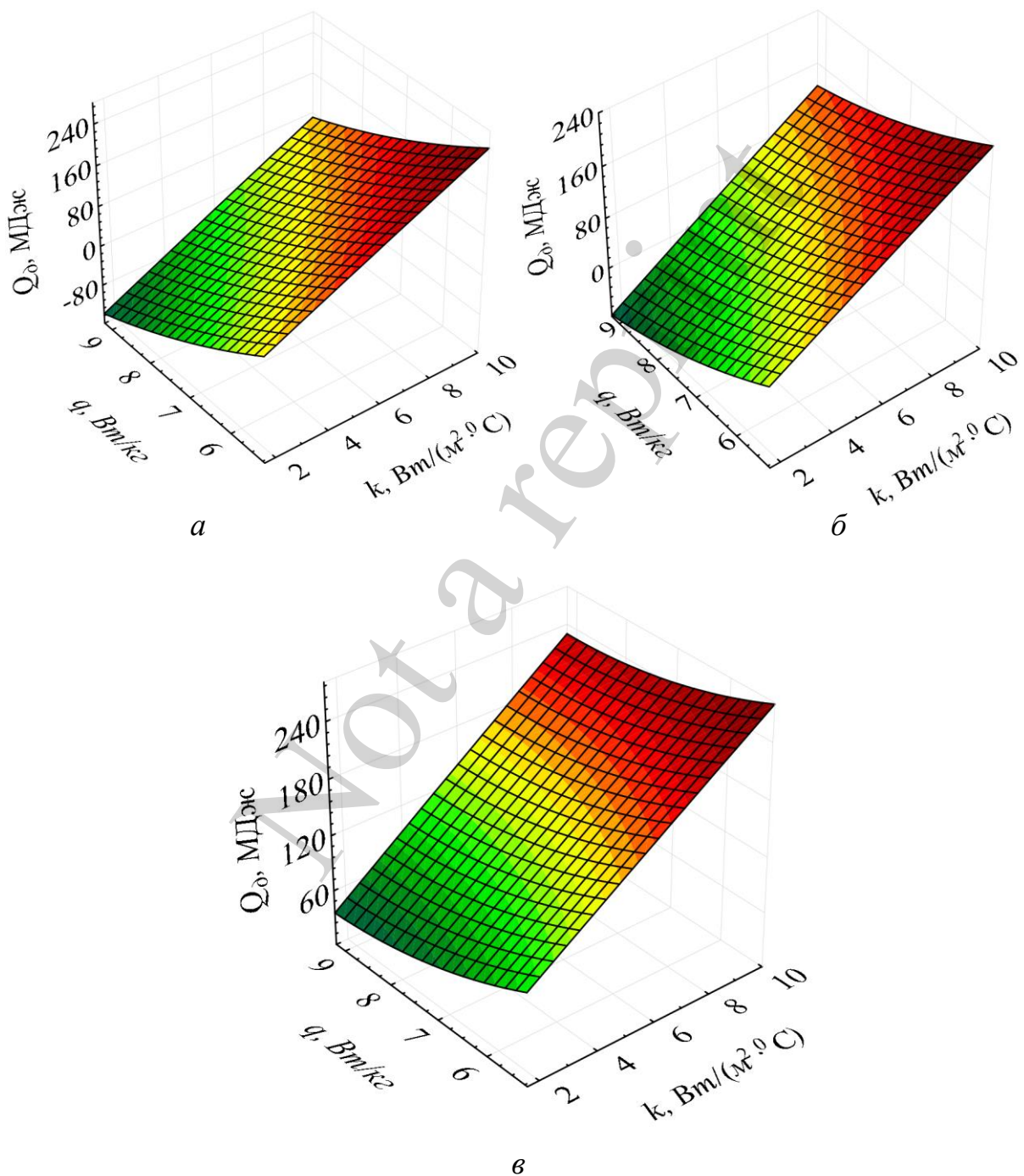


Рис. 2. Залежність витрат теплоти  $Q_d$  від коефіцієнт теплопередачі стінки камери  $k$  та питомого активного тепловиділення субстрату  $q$ : *a* –  $W=45\%$ ; *б* –  $W=60\%$ ; *в* –  $W=75\%$

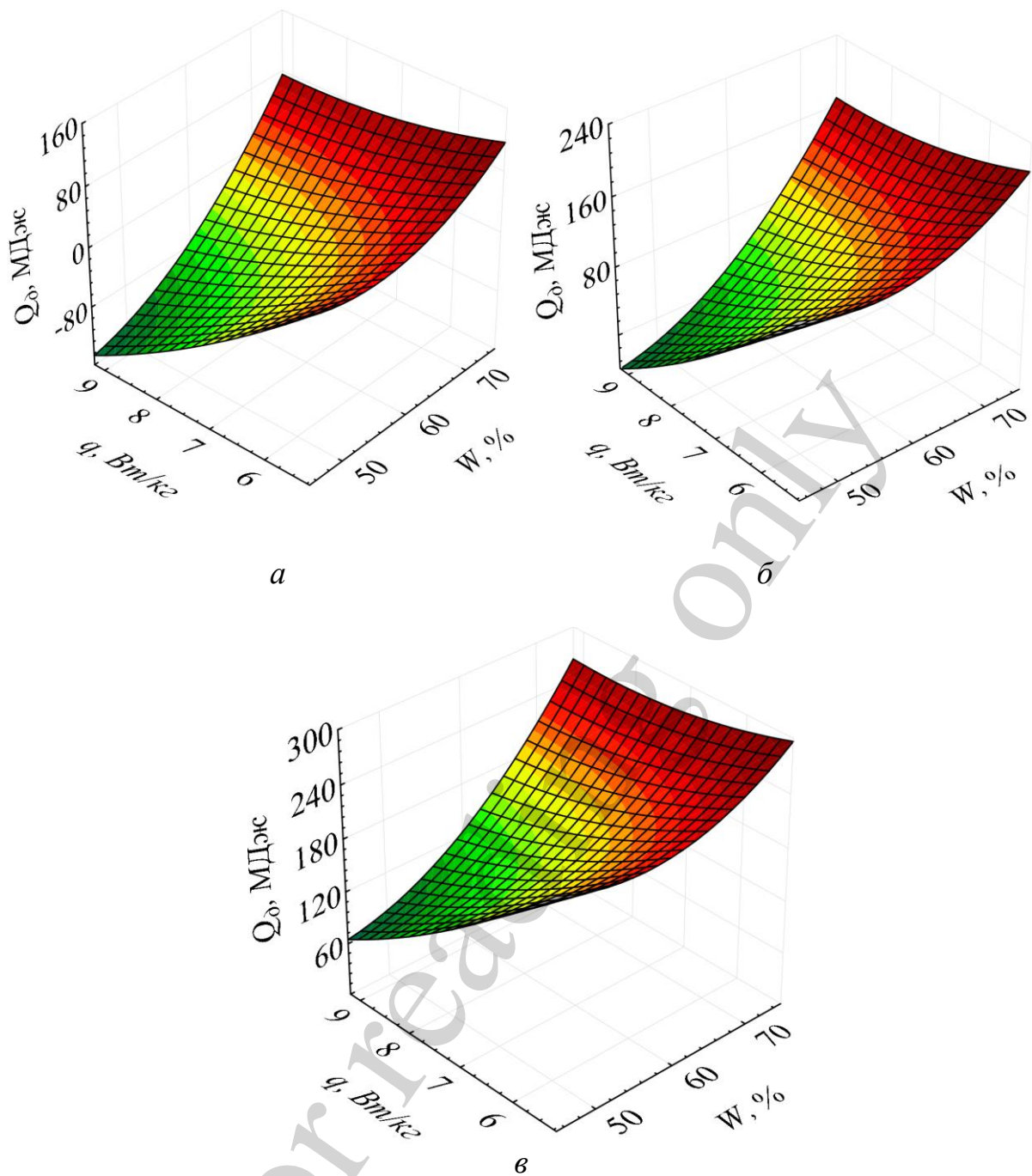


Рис. 3. Залежність витрат теплоти  $Q_d$  від вологості субстрату  $W$  та питомого активного тепловиділення субстрату  $q$ : *a* –  $k=1,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ; *б* –  $k=5,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ; *в* –  $k=10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

Аналіз графічних залежностей рис. 2–4 свідчить про подібність тенденцій залежності витрат теплоти на підтримання оптимального температурного режиму процесу ферментації субстрату від змінних факторів експерименту.

За рис. 2 при фіксованих значеннях температур субстрату і зовнішнього середовища та визначених конструктивних параметрах установки збільшення вологості субстрату  $W$  призводить до збільшення витрати теплоти  $Q_d$  на підтримання процесу компостування. При значеннях коефіцієнту теплопередачі стінки камери  $k=1,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  і питомого активного тепловиділення субстрату



$q=5,2$  Вт/кг для підтримання процесу компостування субстрату вологістю 45 % потрібно близько 54 МДж теплоти (рис. 2, а). Тоді як при компостуванні субстрату вологістю 75 %, при умові забезпечення температурного режиму на термофільній фазі 65 °С...70 °С, витрачається 100,4 МДж теплоти (рис. 2 в). Збільшення вологості субстрату спричиняє суттєве поглинання додаткової кількості теплоти  $Q_d$ , що пов'язано з високим, порівняно з іншими складовими субстрату, значенням питомої теплоємності води – 4200 Дж/(кг·°С).

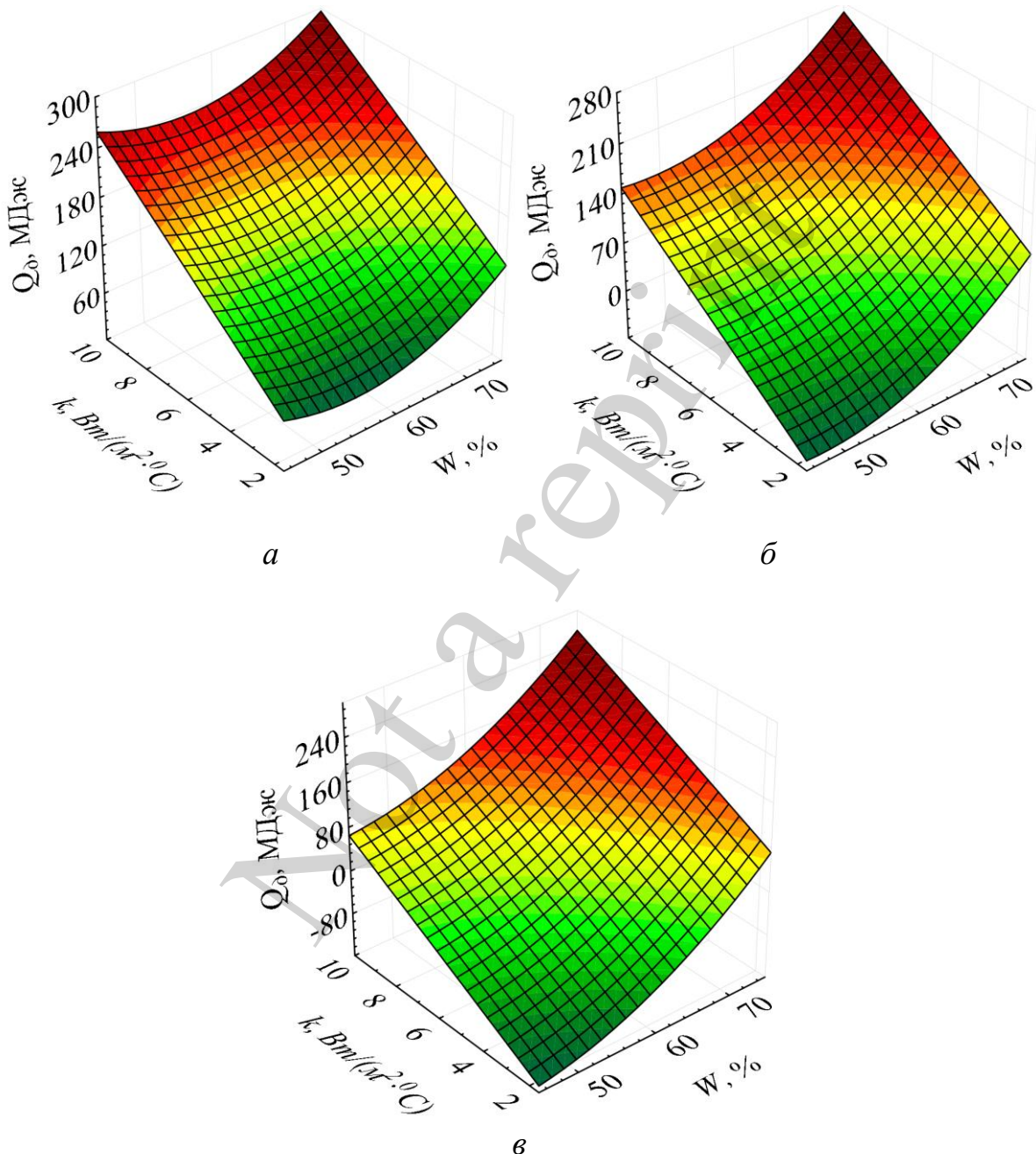


Рис. 4. Залежність витрат теплоти  $Q_d$  від вологості субстрату  $W$  та коефіцієнту теплопередачі стінки камери  $k$ : а –  $q=5,2$  Вт/кг; б –  $q=7,2$  Вт/кг; в –  $q=9,2$  Вт/кг

Однак зазначена тенденція є відмінною для діапазону вологості субстрату  $W=58...62$  %. В даному діапазоні спостерігається незначне скорочення витрат

теплоти  $Q_d$ . Це пояснюється тим, що вологість в межах 58...62 % є оптимальною для розвитку мікроорганізмів і мікробіологічні процеси мають перевагу над теплотехнічними.

Найгірші умови компостування з найбільшою кількістю поглинутої теплоты  $Q_d=278,6$  МДж спостерігаються при вологості субстрату  $W=75$  %, коефіцієнті теплопередачі стінки камери  $k=10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) і значенні питомого активного тепловиділення субстрату  $q=5,2$  Вт/кг (рис. 2 в, 3 в, 4, а).

В дослідженні (рис. 4) із збільшенням показника питомого активного тепловиділення субстрату  $q$  витрати теплоты  $Q_d$  на підтримання оптимальної температури в процесі компостування скорочуються. Так збільшення параметра  $q$  з 5,2 Вт/кг (субстрат 1) до 9,2 Вт/кг (субстрат № 3) призвело до скорочення витрат теплоты майже на 113 МДж при  $W=60$  %,  $k=10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Меншим є скорочення витрат теплоты при вологості  $W=75$  %,  $k=10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) і складає лише 50 МДж. Цей факт пояснюється зниженням життєдіяльності мікроорганізмів при збільшенні вологості  $W$  понад 62...65 %.

Найбільший вплив на витрати теплоты для забезпечення процесу компостування чинить коефіцієнт теплопередачі стінки камери  $k$  (рис. 3). При найвищих значеннях даного параметру  $k=10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) мають місце найвищі втрати теплоты –  $Q_d=248$  МДж при  $W=45$  % і  $q=5,2$  Вт/кг;  $Q_d=237$  МДж при  $W=60$  % і  $q=5,2$  Вт/кг і  $Q_d\approx 279$  МДж при  $W=75$  % і  $q=5,2$  Вт/кг (рис 3, в). Для порівняння (рис. 3, а) при найменших значеннях параметру  $k=1,6$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) на процес компостування було витрачено  $Q_d\approx 54$  МДж при  $W=45$  % і  $q=5,2$  Вт/кг;  $Q_d\approx 52$  МДж при  $W=60$  % і  $q=5,2$  Вт/кг і  $Q_d=100,4$  МДж при  $W=75$  % і  $q=5,2$  Вт/кг. З метою оптимізації процесу компостування рекомендовано конструктивно забезпечити теплоізоляцію стінок барабана камери таким чином, щоб значення коефіцієнту теплопередачі  $k$  було вищим за 4,6 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

## **6. Обговорення результатів дослідження теплового режиму процесу компостування біосировини в камері обертового типу**

Застосування обертових камер ферментації дозволяє отримувати компости високої якості за агрохімічними показниками. Однак для виробництва високоякісних компостів потрібно забезпечувати належний температурний режим на кожній з фаз компостування, особливо на термофільній, коли температура повинна бути в межах 65...70 °С.

Складання теплового балансу дозволило встановити величину кількості теплоты  $Q_d$  (14) необхідну для підтримання належного температурного режиму процесу компостування, а також її залежність від трьох важливих параметрів – вологості субстрату  $W$ , питомого активного тепловиділення субстрату  $q$  та коефіцієнту теплопередачі стінки камери  $k$ .

Сучасне ведення процесу аеробної твердофазної ферментації засноване на головній ролі мікробіоценозу в його реалізації. Створення оптимальних умов для росту і розвитку мікроорганізмів, які здійснюють біотрансформацію, пов'язане з необхідністю регуляції комплексу параметрів ферментації [7, 8] та з використанням різних стимуляторів процесу.

Чисельні експерименти свідчать, що темпи та глибина ферментації залежать від фізико-хімічних характеристик субстратів, її біохімії та мікробіології. До фізико-хімічних характеристик слід віднести рН, вологість, розмір частинок компостованої матриці, тощо. До біохімії та мікробіології – відношення вуглецю до азоту, обсеменіння мікроорганізмами, вмісту макро та мікроелементів, а також токсичних сполук [26].

Проведені дослідження показали, що немаловажним фактором, який залежить від фізико-хімічних характеристик субстрату і впливає на теплові умови процесу компостування, є питома активне тепловиділення (рис. 4). Із збільшенням даного показника теплові витрати на процес компостування скорочуються. Параметр  $q$  може бути однією з регульовальних характеристик процесу компостування. Додавання до субстрату деревної стружки та соломи підвищило значення питомого активного тепловиділення субстрату з 5,2 Вт/кг (№ 1) до 7,2 Вт/кг (№ 2) та до 9,2 Вт/кг (№ 3) відповідно.

Максимальний ріст температури було зафіксовано в дослідах з субстратом № 3, який містив соломучку (мають місце найменші витрати теплоти на процес, рис. 4, в). Також для субстрату з вмістом соломи характерною є мінімальна швидкість його охолодження. Це пов'язано з тим, що в даному випадку мікробна активність зберігалася на досить високому рівні до кінця процесу. Для дослідів з субстратом № 3 максимальна тривалість термофільної фази складала 5 діб з температурою 68 °С, що свідчило про позитивний вплив соломи на метаболізм мікроорганізмів термофільної групи. Для порівняння у дослідах з субстратом № 1 тривалість термофільної фази становила 6 діб при максимальній температурі цієї фази 61 °С.

Вміст в субстраті № 2 деревної стружки сприяв швидкому розігріванню суміші та скороченню тривалості термофільної фази порівняно з субстратами № 1 та № 3. Теплові витрати на процес (рис. 4, б) суттєво зменшились порівняно з субстратом № 1 (рис. 4, а). Термофільна фаза тривала 4 доби з максимальною температурою цієї фази 65 °С. Скорочення тривалості термофільної фази свідчить про інгібуючий ефект надлишку лігноцелюлозних компонентів по відношенню до термофільної мікрофлори. Додавання деревної стружки до субстрату підвищило його кислотність.

Виходячи з досліджень (рис. 4), для забезпечення оптимального температурного режиму на термофільній фазі (65...70 °С) значення питомого активного тепловиділення субстрату повинне бути вищим за  $q=7,2$  Вт/кг.

Результати, зазначені в [17–19, 21], вказують на можливість збільшення показника питомого активного тепловиділення субстрату створенням багатокомпонентних сумішей на основі складових, які збільшують тепловиділення в процесі компостування. Однак дане питання вимагає проведення додаткових досліджень з визначення відсоткового вмісту окремих компонентів у субстраті. Деякі добавки мають інгібуючий вплив на активність мікрофлори, як у випадку із субстратом № 2, який містив деревну стружку.

З метою встановлення впливу теплового режиму на якісні показники виробленого компосту з субстратів № 1–3 було досліджено їх хімічний склад.

Компост № 1 мав наступний склад – азот  $N_{\text{заг}}=2,01\%$ ;  $P_2O_5=1,77\%$ ;  $K_2O=1,73\%$ ;  $C_{\text{заг}}=18,3$ ; зольність –  $16,92\%$ ; вологість  $54\%$ .

Компост № 2 складався – азот  $N_{\text{заг}}=1,71\%$ ;  $P_2O_5=1,73\%$ ;  $K_2O=1,19\%$ ;  $C_{\text{заг}}=21,07$ ; зольність –  $15,4\%$ ; вологість  $56\%$ .

Компост № 3 – азот  $N_{\text{заг}}=2,03\%$ ;  $P_2O_5=1,92\%$ ;  $K_2O=1,71\%$ ;  $C_{\text{заг}}=22,46$ ; зольність –  $15,99\%$ ; вологість  $58\%$ . Для компостів № 1–3 усі значення наведено у  $\%$  на абсолютно суху речовину. Вологість вихідних субстратів № 1, 2, 3 становила  $62\%$ .

Найвищі добривні властивості мав компост № 3 з вмістом соломи, для якого характерною була висока температура упродовж усього циклу компостування (рис. 4, в). Найнижчі добривні властивості у компосту № 2, хоча активна фаза компостування субстрату № 2 також характеризувалася відносно високим температурним режимом (рис. 4, б). Причина, як зазначалося, полягає в скороченні термофільної фази до 4 діб, чого було недостатньо для завершення мікробіологічних процесів даної фази. Оскільки додавання деревної стружки до субстрату підвищує значення його питомого активного тепловиділення в цілому, отже причина криється в правильному розрахунку відсоткового вмісту даного компонента в суміші.

Вважається, що пік активності аеробних мікроорганізмів досягається при такій максимальній вологості субстрату, що зброджується, яка не перешкоджає дифузії кисню через шар води до частинок компонентів субстрату. За [3, 23] для ефективного протікання процесу зброджування, не лімітованого аерацією, вологість субстрату повинна бути в межах  $45\text{--}70\%$ . В результаті досліджень найкращі теплові умови для протікання процесу компостування спостерігалися при вологості субстрату в межах від  $58$  до  $62\%$  (рис. 2). В даному діапазоні значень вологості при сталих значеннях коефіцієнту теплопередачі стінки камери витрати теплоти на процес компостування для досліджуваних субстратів № 1, № 2 та № 3 були суттєво нижчими ніж при вологості  $75\%$  (рис. 2, в). А також незначною мірою перевищували витрати теплоти на процес при вологості  $45\%$ . При вологості понад  $75\%$  спостерігалось вилугування поживних речовин, об'ємний вміст кисню знижувався, починалися анаеробні процеси і темпи біодеградації скорочувалися. Також волога, як хімічна речовина, має досить високе значення питомої теплоємності, що додатково погіршує температурні умови процесу. Із зменшенням вологості до  $45\%$  (при інших сталих параметрах) температура субстрату починала рости (теплові витрати на процес найменші, рис. 2, а). Однак на термофільній фазі температура становила лише  $58\text{ }^\circ\text{C}$ , не досягнувши свого максимального значення. Максимальне значення температури термофільної фази становило  $68\text{ }^\circ\text{C}$  і було отримано при компостуванні субстрату вологістю  $58\%$ . Це свідчить, що зменшення вологості субстрату сповільнює активність мікрофлори, і при значеннях вологості  $20\%$  і менше активність повністю зупиняється, що підтверджується дослідженнями [26].

Відповідно, із підвищенням коефіцієнту теплопередачі стінки камери з  $1,6\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$  до  $10\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$  витрати теплоти на процес компостування зростали (рис. 3). При найвищих значеннях даного параметру  $k=10\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$  мали місце найвищі втрати теплоти –  $Q_{\text{д}}\approx 279\text{ МДж}$  на активну фазу процесу компостування при вологості субстрату  $W=70\%$  (рис. 3 в).

При теплоізоляції барабану (досягненні  $k=1,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ) і компостуванні субстрату № 1 ( $q=9,2 \text{ Вт/кг}$ ) вологістю 58 % спостерігалось надлишкове виділення теплоти в межах 140 МДж (рис. 3, а). Дану теплоту можна використати для забезпечення інших технологічних процесів (підігрівання повітря аерації).

З метою оптимізації процесу компостування слід конструктивно забезпечити теплоізоляцію стінок барабана камери, щоб значення коефіцієнту теплопередачі  $k$  було нижчим за  $4,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$  (рис. 3), або використовувати додаткове зовнішнє джерело енергії. При дотриманні зазначених умов можна досягти мінімальних значень додаткових витрат теплоти, необхідної для підтримання температурного режиму процесу компостування, а в деяких випадках навіть мати надлишок теплоти.

Однак, через нестабільність тепловиділення протягом циклу, а також через коливання температури зовнішнього середовища, повністю відмовитись від системи регулювання додаткової теплоти недоцільно. Параметром оптимізації, в першу чергу, повинна бути тривалість перебування субстрату в реакторі і пов'язані з нею енергетичні витрати на процес компостування та якісні показники готового продукту, а не витрати теплоти на процес.

Діапазон числових значень вхідних змінних (табл. 1) обирався як найбільш застосований в технології компостування, виходячи з досліджень [10, 21, 26]. Інші параметри дослідження визначалися виходячи з конструктивних особливостей установки та властивостей субстрату і їх вплив на модель не досліджувався. Якщо розглянути, то параметри  $k$ ,  $q$  і  $W$  мають більш комплексний вплив на функцію відгуку  $Q_d$  (витрати теплоти на процес). Зокрема,  $k$  – це параметр, який враховує вид матеріалу стінок, їх конструктивне виконання, товщину шарів теплоізоляції, щільність їх прилягання, а також тепловіддачу від субстрату до стінок камери і до навколишнього середовища. Однак стабільність параметра  $k$  залежить від переліку неврахованих факторів, таких як наявність значної конвекції, корозійне зношення стінок барабану, що збільшує величину тепловтрат в навколишнє середовище. Нехтування суттєвістю вказаних факторів може впливати на відтворюваність експерименту.

Камера обертового типу (рис. 1) в порівнянні з аналогами [2, 4, 26] має просту конструкцію і відрізняється високою експлуатаційною надійністю. Забезпечення рівномірного обігрівання стінок камери теплотою, підведеною від зовнішніх джерел енергії, дозволило підтримувати належний температурний режим на кожній з фаз процесу компостування. В конструкції передбачено можливість регулювання частоти обертання камери (забезпечує рівномірність змішування компонентів у субстраті) та об'ємом повітря для аерації субстрату, що підвищує точність керування процесом. Застосування даної конструкції дозволяє скоротити, в залежності від складу субстрату, час компостування на 20%, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність установки по виробленому компосту та оптимізувати енергетичні витрати.

Вказані переваги дозволяють широко застосовувати камеру: на сільськогосподарських підприємствах, де є відходи рослинництва, тваринництва, деревообробки; у садово-паркових комплексах та в житлово-комунальних господарствах для утилізації твердих побутових біовідходів.

Перспективними шляхами подальшого розвитку дослідження є визначення оптимальних геометричних параметрів установки, їх впливу на продуктивність установки та енергомісткість готової продукції.

## 7. Висновки

1. Виходячи з рівняння теплового балансу для процесу компостування біосировини складено математичну модель. Модель дозволяє встановити залежність кількості теплоти, необхідної для підтримання оптимального теплового режиму процесу компостування, від коефіцієнту теплопередачі стінки камери, вологості та питомого активного тепловиділення субстрату. Математична модель має високу відповідність експериментальним даним. Коефіцієнт детермінації складає 0,98.

2. Експериментально досліджено вплив коефіцієнту теплопередачі стінки камери, вологості та питомого активного тепловиділення субстрату на тепловий режим процесу компостування. Встановлено, що:

– збільшення вологості субстрату призводить до збільшення витрати теплоти на підтримання теплового режиму процесу компостування. Найвищі витрати теплоти на процес компостування 279 МДж спостерігаються при вологості субстрату 70 %, коефіцієнту теплопередачі стінки камери  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  і показнику питомого активного тепловиділення субстрату  $5,2 \text{ Вт}/\text{кг}$ . Оптимальною, як для підтримання температурного режиму процесу, так і для забезпечення життєдіяльності мікроорганізмів є вологість 58...62 %;

– із збільшенням питомого активного тепловиділення субстрату витрати теплоти на підтримання теплового режиму процесу компостування скорочуються. Збільшення питомого активного тепловиділення субстрату з  $5,2 \text{ Вт}/\text{кг}$  до  $9,2 \text{ Вт}/\text{кг}$  призвело до скорочення витрат теплоти на процес компостування майже на 113 МДж. Дані отримано при вологості субстрату 60 % і значенні коефіцієнта теплопередачі стінки камери  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

– із підвищенням коефіцієнту теплопередачі стінки камери з  $1,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  до  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  витрати теплоти на процес компостування зростають. Зменшення коефіцієнту теплопередачі до  $1,6 \text{ Вт}/[\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$  (шляхом теплоізоляції) призводить до виділення 140 МДж надлишкової кількості теплоти в процесі компостування субстрату вологістю 58 % із значенням питомого активного тепловиділення  $9,2 \text{ Вт}/\text{кг}$ .

Отримані результати стверджують про можливість застосування залежності (14) для виконання теоретичного моделювання теплових процесів в ферментаційних камерах при виробництві компостів з біосировини.

## Література

1. Hemati, A., Aliasghar zad, N., Khakvar, R., Khoshmanzar, E., Asgari Lajayer, B., van Hullebusch, E. D. (2021). Role of lignin and thermophilic lignocellulolytic bacteria in the evolution of humification indices and enzymatic activities during compost production. *Waste Management*, 119, 122–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.042>

2. Arora, S., Rani, R., Ghosh, S. (2018). Bioreactors in solid state fermentation technology: Design, applications and engineering aspects. *Journal of Biotechnology*, 269, 16–34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.01.010>
3. Jaramillo, A. C., Cobas, M., Hormaza, A., Sanromán, M. Á. (2017). Degradation of Adsorbed Azo Dye by Solid-State Fermentation: Improvement of Culture Conditions, a Kinetic Study, and Rotating Drum Bioreactor Performance. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228 (6). doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3389-2>
4. Kauser, H., Pal, S., Haq, I., Khwairakpam, M. (2020). Evaluation of rotary drum composting for the management of invasive weed *Mikania micrantha* Kunth and its toxicity assessment. *Bioresource Technology*, 313, 123678. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123678>
5. Shikata, A., Sermsathanaswadi, J., Thianheng, P., Baramée, S., Tachaapaikoon, C., Waeonukul, R. et. al. (2018). Characterization of an Anaerobic, Thermophilic, Alkaliphilic, High Lignocellulosic Biomass-Degrading Bacterial Community, ISHI-3, Isolated from Biocompost. *Enzyme and Microbial Technology*, 118, 66–75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2018.07.001>
6. Radziemska, M., Mazur, Z. (2015). Effect of compost from by-product of the fishing industry on crop yield and microelement content in maize. *Journal of Ecological Engineering*, 16, 168–175. doi: <https://doi.org/10.12911/22998993/59378>
7. Jiang, Z., Li, X., Li, M., Zhu, Q., Li, G., Ma, C. et. al. (2021). Impacts of red mud on lignin depolymerization and humic substance formation mediated by laccase-producing bacterial community during composting. *Journal of Hazardous Materials*, 410, 124557. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124557>
8. Duan, Y., Awasthi, S. K., Liu, T., Verma, S., Wang, Q., Chen, H. et. al. (2019). Positive impact of biochar alone and combined with bacterial consortium amendment on improvement of bacterial community during cow manure composting. *Bioresource Technology*, 280, 79–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.026>
9. Liu, H., Wang, L., Lei, M. (2019). Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature. *Bioresource Technology*, 273, 25–33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.033>
10. Wang, Y., Pang, L., Liu, X., Wang, Y., Zhou, K., Luo, F. (2016). Using thermal balance model to determine optimal reactor volume and insulation material needed in a laboratory-scale composting reactor. *Bioresource Technology*, 206, 164–172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.097>
11. Ahn, H. K., Richard, T. L., Choi, H. L. (2007). Mass and thermal balance during composting of a poultry manure – Wood shavings mixture at different aeration rates. *Process Biochemistry*, 42(2), 215–223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.08.005>
12. Smith, B. A. M., Eudoxie, G., Stein, R., Ramnarine, R., Raghavan, V. (2020). Effect of neem leaf inclusion rates on compost physico-chemical, thermal and spectroscopic stability. *Waste Management*, 114, 136–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.026>



13. He, X., Han, L., Huang, G. (2020). Analysis of regulative variables on greenhouse gas emissions and spatial pore gas concentrations with modeling during large-scale trough composting. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124066. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124066>
14. Korolev, S. A., Maykov, D. V. (2012). Identification of a mathematical model and research of the various modes of methanogenesis in mesophilic environments. *Computer Research and Modeling*, 4 (1), 131–141. doi: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2012-4-1-131-141>
15. Uvarov, R., Briukhanov, A., Spesivtsev, A., Spesivtsev, V. (2017). Mathematical model and operation modes of drum-type biofermenter. *Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*. Jelgava, 1006–1011. doi: <https://doi.org/10.22616/erdev2017.16.n212>
16. Малаков, Ю. Ф., Соколов, А. В. (2008). Модель процесса работы устройства для переработки органических отходов. *Актуальные проблемы науки в АПК: Материалы 59-й международной научно-практической конференции: Т. 3. Кострома: Изд. КГСХА, 166–169.*
17. Irvine, G., Lamont, E. R., Antizar-Ladislao, B. (2010). Energy from Waste: Reuse of Compost Heat as a Source of Renewable Energy. *International Journal of Chemical Engineering*, 2010, 1–10. doi: <https://doi.org/10.1155/2010/627930>
18. Kaya, K., Ak, E., Yaslan, Y., Oktug, S. F. (2021). Waste-to-Energy Framework: An intelligent energy recycling management. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 30, 100548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100548>
19. Ghaly, A. E., Alkoaik, F., Snow, A. (2006). Thermal balance of invessel composting of tomato plant residues. *Canadian Biosystems Engineering*, 48, 6.1–6.11.
20. Bach, P. D., Nakasaki, K., Shoda, M., Kubota, H. (1987). Thermal balance in composting operations. *Journal of Fermentation Technology*, 65 (2), 199–209. doi: [https://doi.org/10.1016/0385-6380\(87\)90165-8](https://doi.org/10.1016/0385-6380(87)90165-8)
21. Alkoaik, F., Abdel-Ghany, A., Rashwan, M., Fulleros, R., Ibrahim, M. (2018). Energy Analysis of a Rotary Drum Bioreactor for Composting Tomato Plant Residues. *Energies*, 11 (2), 449. doi: <https://doi.org/10.3390/en11020449>
22. Santos, D. A., Dadalto, F. O., Scatena, R., Duarte, C. R., Barrozo, M. A. S. (2015). A hydrodynamic analysis of a rotating drum operating in the rolling regime. *Chemical Engineering Research and Design*, 94, 204–212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.028>
23. Toundou, O., Pallier, V., Feuillade-Cathalifaud, G., Tozo, K. (2021). Impact of agronomic and organic characteristics of waste composts from Togo on *Zea mays* L. nutrients contents under water stress. *Journal of Environmental Management*, 285, 112158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112158>
24. Грищук, Ю. С. (2008). *Основи наукових досліджень*. Харків: НТУ «ХП», 232.
25. Мельников, С. В., Ацелкин, В. Р., Рощин, П. М. (1980). *Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов*. Л.: Колос, 168.
26. Krishna, C. (2005). Solid-State Fermentation Systems – An Overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25 (1-2), 1–30. doi: <https://doi.org/10.1080/07388550590925383>