УДК 628.385

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ВЕРМИКУЛЬТИВУВАННЯ

А. І. Чміль, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: a.chmil@ukr.net

Анотація. *Останнім часом у зв'язку з погіршенням екологічної ситуації та з метою реанімації ґрунтів, підвищення їх родючості і стійкості до водної і вітрової ерозії світова наука і практика звертаються до біологічного землеробства, основаного на виключенні або значному зменшенні застосування мінеральних добрив і пестицидів та широкому використанні біогумусу – продукту життєдіяльності дощових черв'яків. Ефективність процесів перетворення енергії при біоконверсії органічних відходів у біогумус і білковий корм розглянуто на прикладі захищеної культивацийної споруди наземного типу, що дозволяє цілорічно отримувати цінну продукцію для сільського господарства. Проаналізовано складові рівняння енергетичного балансу вермивиробництва та визначено ступінь їх впливу на коефіцієнт біоенергетичної ефективності.*

Для забезпечення оптимального мікроклімату у вермикультивацийній споруді необхідна кількісна оцінка параметрів температурно-вологісного режиму. Розв'язок цієї задачі можливий на основі рівняння теплового балансу, складеного для найбільш важких температурних умов у вермикультивацийній споруді. Такі умови мають місце в зимовий період її експлуатації.

Витрати електроенергії можна значно знизити, застосовуючи різні засоби утеплення вермикультивацийних споруд: солом'яні мати, паперові і поролонові покривала.

Не менш суттєвий вплив на енергетичну ефективність вермикультуваційної споруди має співвідношення потужностей субстратних і повітряних нагрівальних елементів. Як відомо, температура субстрату задається технологією вермикультивування і повинна підтримуватись на постійному рівні. Температура повітря у вермикультивацийній споруді залежить від умов зовнішнього середовища та співвідношення потужностей субстратних і повітряних нагрівальних елементів

Ключові слова: *вермикультивування, енерговитрати, тваринницькі відходи*

Актуальність. *У природі існує багато різних видів дощових черв'яків, більшість з яких на території України належать до сімейства люмбрицид, проте*

лише деякі з них піддаються розведенню за штучних умов. Це гноєвий черв'як *Eisenia foetida*, звичайний дощовий черв'як *Lumbricus terrestris* і декілька інших видів.

Промислове вермикультивування з метою отримання наживки для рибної ловлі вперше здійснено в США в кінці 1940-х років.

У даний час промислове вермикультивування знайшло широке застосування в США, ФРН, Італії, Франції, Швейцарії, Польщі, Угорщині, Японії, Китаї та інших країнах для переробки органічної сировини на біогумус, як білкові кормові добавки в раціони сільськогосподарських тварин, птиці, риб, а також у фармакологічній, парфюмерній і харчовій промисловості. Особливо значні успіхи в підвищенні продуктивності вермикультури були отримані після 1959 р., коли в університеті штату Каліфорнія лікарем Барретом після двадцятирічної роботи із звичайним гноєвим черв'яком була виведена нова раса - каліфорнійський червоний гібрид. На відміну від звичайного дощового черв'яка, тривалість життя якого в середньому становить 4 роки, червоний гібрид живе 16 років, він пристосований до життя за штучних умов (втратив інстинкт покидати своє місцеперебування за незвичних умов середовища), дуже плідний, швидко росте, не хворіє і живиться різними органічними відходами. Він, як і всі дощові черв'яки, гермафродит, тобто в кожного дорослого черв'яка є одночасно і чоловіча і жіноча полова системи. Починаючи з 90-го дня життя після опліднення в кожного черв'яка утворюється кокон, з якого через 14-21 діб виводяться від 2 до 20 черв'яків.

Кількість молодих черв'яків і швидкість розкладання органічних відходів залежать від стану і кількості органічної їжі та параметрів зовнішнього середовища (температура, вологість субстрату, відсутність аміаку, кислотний режим). При їх оптимальному поєднанні дві особини дощового черв'яка за рік можуть відтворити в середньому 1500 молодих черв'яків.

Численними дослідженнями встановлено, що склад корму найбільш суттєво

впливає на життєдіяльність дощових черв'яків. У складі корму повинні бути білки, вуглеводні, мінеральні речовини, вітаміни і клітковина. Найбільш придатними для цієї цілі вважається кінський гній, гній ВРХ, свиней, овець, а також послід птиці. Якість субстрату поліпшується при його перемішуванні і додаванні відходів баштанних і плодовоовочевих культур. Обов'язковою умовою є попередня ферментація субстрату для попередження можливості отруєння надмірною концентрацією протеїну. За цих умов досить обнадійливими є результати використання для живлення черв'яків продуктів анаеробної ферментації [2].

За даними акад. Городнього М.М. та ін.[1], стандартними умовами, за яких ведеться промислове вермикультивування, є: підтримання температури субстрату в діапазоні 19-22°C, вологості - 70-80%, кислотності субстрату рН=7-8; співвідношення вуглеводнів до азоту в межах 20; аерація субстрату повітрям.

Оскільки черв'яки характеризуються швидким ростом, важливим фактором промислового вермикультивування є щільність популяції. Оптимальна початкова щільність заселення маточною культурою субстрату, за даними ряду спеціалістів, повинна бути в межах 1,5-2 тис. особин на 1 м². Із збільшенням цього показника відмічається підвищена збудженість черв'яків, а за його високого значення спостерігаються випадки канібалізму. У зв'язку з цим не рекомендується перевищувати щільності 10-12 тис.шт/м².

Таким чином, процес біоконверсії органічних відходів шляхом вермикультивування полягає в проходженні через шлунок черв'яків органічної маси і виділенні її у вигляді екскрементів (копролітів) скріплених слизовими виділеннями шлунку і насичених ферментами, вітамінами та мікроорганізмами. Промислове вермикультивування здійснюється як на відкритих ділянках, так і в закритих спорудах. У вітчизняній і зарубіжній науковій літературі наводяться різні способи вирощування черв'яків [2], проте найбільш поширеним і дешевим є вермикультивування в ложах. Під однією стандартою ложею розуміють

ємкість з габаритними розмірами 2х1х0,25 м, в якій здійснюється вермикультивування і має знаходитись до 100 тис. черв'яків, включаючи дорослі і молоді особини, а також кокони з яйцями. На одне ложе необхідно 10-12 ц/рік органічної речовини вологістю 70-80%. 40% її йде на задоволення життєвих потреб черв'яків, а 60% виділяється у вигляді біогумусу. Ложі для кращого обслуговування формуються в секції.

Даний спосіб набув широкого поширення і в нашій країні. Найбільший досвід у вермикультивуванні в ложах отриманий в асоціації "Біоконверсія" Івано-Франківської обл. Маточну культуру червоного каліфорнійського черв'яка в кількості 6 млн шт. асоціація завезла з Польщі, а в 1990 р. у господарстві їх вже було 700 млн шт., виробництво біогумусу становило 1000 т.

Розведення черв'яків у приміщеннях і теплицях здійснюється на стелажах, у контейнерах або бетонних лотках. Так, французька компанія "GreenFree" розробила установку у вигляді циліндричної башти діаметром 2,5 м, яка складається з 24 пластикових піддонів, поставлених один на одний. Весь процес вермикультивування повністю автоматизований [3].

В Італії для інтенсифікації процесу біоконверсії відходів вермикультивування пропонується здійснювати в сталевому конусоподібному бункері висотою 10 м, діаметром у верхній частині 2 м, а в нижній - 0,5 м. Відходи, заселені черв'яками, завантажують у верхню частину і перемішують шнеком, що покращує аерацію та створює сприятливі умови для життєдіяльності черв'яків і швидко переробку відходів, а в нижній, що не аерується, збирають готовий компост. Продуктивність такої установки - 1 т компосту за добу.

Дослідами встановлено, що застосування в польових дослідах біогумусу з розрахунку 3-5 т/га підвищує врожайність томатів на 25 % (при врожайності 250 ц/га), капусти до 27 % при 800 ц/га, картоплі до 22 % при 250 ц/га, кукурудзи на силос до 30 % при 450 ц/га, у закритому ґрунті огірків до 17 % і томатів до 16 % при врожайності 25 кг/м². При цьому значно поліпшується їх якість,

підвищується вміст вітаміну С, вуглеводнів, різко знижується кількість нітратів.

Крім біогумусу в сільськогосподарському виробництві широко використовується і біомаса черв'яків, яка містить майже всі амінокислоти, до 60% сирого протеїну, 6-9% ліпідів і 7-16 % азотистих екстрактивних речовин.

Черв'яків можна годувати свиням, курям, рибі, бичкам як у сирому, так і вареному вигляді, у кількості, що задовольняє їх потреби в білку. М'ясо тварин при цьому набуває високих товарних властивостей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Накопичено значний досвід щодо використання продукту переробки черв'яків - біогумусу. За даними ряду вчених [2], біогумус порівняно з іншими органічними добривами (гній, компост, торф, сапропель) має ряд переваг - високий ступінь гуміфікації, водостійка структура, збагаченість біологічно активними речовинами, відсутність насіння бур'янів, фіто і зоопатогенів. Особливу цінність біогумусу надають гумінові кислоти, вміст яких коливається від 5,6 до 17,6% у перерахунку на суху речовину. Крім розкладених відходів у біогумусі міститься і певна кількість вмерлих черв'яків, що також підвищує цінність добрив. Крім цього елементи живлення біогумусу, знаходячись в органічній формі не піддаються вимиванню і служать джерелом його пролонгованої дії.

Мета дослідження – оцінка енергетичної ефективності процесу вермикультивування.

Матеріали та методи дослідження. Ефективність процесів перетворення енергії при біоконверсії органічних відходів у біогумус і білковий корм розглянемо на прикладі захищеної культиваційної споруди наземного типу, що дозволяє цілорічно отримувати цінну продукцію для сільського господарства.

Баланс енергії для вермивиробництва представимо у вигляді

$$E_{\text{заг}}^{\text{вк}} = E_{\text{бч}} + E_{\text{бг}} + E_{\text{огр}} + E_{\text{вип}} + E_{\text{п}} + E_{\text{ін}}, \quad (1)$$

де $E_{\text{заг}}^{\text{вк}}$ - загальні витрати енергії на вермикультивування; $E_{\text{бч}}$ – енерговміст біомаси черв'яків; $E_{\text{бг}}$ - енерговміст біогумусу; $E_{\text{огр}}$ - втрати теплової енергії

через огорожі; $E_{\text{вип}}$ - втрати теплової енергії на випаровування; $E_{\text{п}}$ - втрати теплової енергії з отриманою продукцією (біогумус і біомаса черв'яків); $E_{\text{інш}}$ - інші втрати енергії.

Загальні витрати енергії $E_{\text{ітв}}$ у свою чергу включають такі складові:

$$E_{\text{ітв}}^{\text{БК}} = E_{\text{еф}} + E_{\text{об}} + E_{\text{б}} + E_{\text{ее}} + E_{\text{п}} + E_{\text{жп}}, \text{ ГДж} \quad (2)$$

де $E_{\text{еф}}$ - енерговміст органічних відходів, що надходять на корм черв'якам (тверда фракція ефлюента); $E_{\text{об}}$ - на обладнання і машини; $E_{\text{б}}$ - енерговитрати на будівлі і споруди; $E_{\text{ее}}$ - витрати електричної енергії; $E_{\text{п}}$ - витрати енергії палива; $E_{\text{жп}}$ - енерговитрати живої праці.

Проаналізуємо складові рівняння енергетичного балансу вермивиробництва та визначимо ступінь їх впливу на коефіцієнт біоенергетичної ефективності.

Для забезпечення оптимального мікроклімату у вермикультиваційній споруді необхідна кількісна оцінка параметрів температурно-вологісного режиму. Розв'язок цієї задачі можливий на основі рівняння теплового балансу, складеного для найбільш важких температурних умов у вермикультиваційній споруді. Такі умови мають місце в зимовий період її експлуатації.

Рис. 1. Розрахункова схема теплового балансу вермикультиваційної споруди

На основі вивчення теплових потоків, представлених на (рис. 1), запишемо математичну модель для стаціонарного теплового режиму споруди. Оскільки напрямки потоків теплоти і маси до вирішення системи невідомі, тому у всіх рівняннях сума потоків є алгебраїчною. Тоді розрахунковій схемі потоків

теплоти відповідає така система рівнянь теплових балансів:

На поверхні субстрату

$$Q_{\text{ср}} + Q_{\text{тср}} + Q_{\text{зср}} + Q_{\text{кср}} + Q_{\text{вср}} + Q_{\text{в}} = 0, \quad (3)$$

де $Q_{\text{ср}}$ - тепловий потік від субстратного обігріву в культивацийній споруді; $Q_{\text{тср}}$ - теплові втрати через субстрат зовні; $Q_{\text{зср}}$ - теплота, що акумулюється субстратом; $Q_{\text{кср}}$ - конвективний тепловий потік на поверхні субстрату; $Q_{\text{вср}}$ - конвективний тепловий потік від повітряного обігріву на субстрат; $Q_{\text{в}}$ - тепловий потік на випаровування;

Об'єм внутрішнього повітря

$$Q_{\text{кср}} + Q_{\text{квк}} + Q_{\text{кго}} + Q_{\text{пк}} = 0, \text{ Вт}, \quad (4)$$

де $Q_{\text{кср}}$ - потік від калорифера повітряного обігріву; $Q_{\text{кго}}$ - конвективний тепловий потік до огорожі; $Q_{\text{пк}}$ - витрати теплоти, обумовлені повітрообміном;

на внутрішній поверхні огорожі

$$Q_{\text{кго}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{ккн}} + Q_{\text{пкн}} + Q_{\text{сго}} = 0, \text{ Вт}, \quad (5)$$

де $Q_{\text{к}}$ - тепловий потік від конденсації; $Q_{\text{ккн}}$ - конвективний тепловий потік від огорожі зовні; $Q_{\text{пкн}}$ - променевий тепловий потік від огорожі у зовнішній простір; $Q_{\text{сго}}$ - променевий тепловий потік між субстратом і огорожею.

Рівняння балансу за вологою для внутрішнього об'єму повітря:

$$W_{\text{ср}} + W_{\text{к}} + W_{\text{в}} + W_{\text{п}} = 0, \text{ кг/с}, \quad (6)$$

де $W_{\text{ср}}$ - витрати води на випаровування з поверхні субстрату; $W_{\text{к}}$ - витрати води, що видаляється при конденсації на огорожі; $W_{\text{в}}$ - витрати води, що видаляється з вентиляційним повітрям; $W_{\text{п}}$ - витрати води, що вноситься в споруду додатково.

Запишемо в розгорнутому вигляді рівняння балансу теплоти за проміжок часу dt для вермикультиваційної споруди окремо для субстрату для повітря за умови, що температура субстрату вище температури повітря в культивацийній споруді.

Для субстрату

$$P_c d\tau = k_c F_c (t_c - t_r) d\tau + k_{cr} F_{cr} (t_c - t_r) d\tau + C_r m_r dt_r \quad (7)$$

або

$$P_c = \frac{t_c - t_r}{R_c} + \frac{t_c - t_r}{R_{cr}} + C_r m_r \frac{dt_r}{d\tau} \quad (8)$$

де P_c - потужність субстратного нагрівального елементу, Вт; k_c, k_{cr} -коефіцієнти тепловіддачі відповідно від субстрату до ґрунту і від субстрату до повітря, Вт/м² °С; F_c, F_{cr} -площі тепловіддачі відповідно від субстрату в оточуючий ґрунт і від субстрату до повітря вермикультивацийної споруди, м²; t_c, t_r, t_n - відповідно температура субстрату, ґрунту і повітря споруди, °С; $C_r m_r$ - питома теплоємність і маса субстрату у вермикультивацийній споруді, Дж/кг °С кг; R_c, R_{cr} -опори тепловіддачі відповідно від субстрату до ґрунту і від субстрату до повітря споруди, °С/Вт.

Для повітря вермикультивацийної споруди

$$P_b d\tau = k_o F_o (t_b - t_n) d\tau - k_{cb} F_{cb} (t_c - t_b) d\tau + C_b m_b dt_b \quad (9)$$

або

$$P_b = \frac{t_b - t_n}{R_o} - \frac{t_c - t_b}{R_{cb}} + C_b m_b \frac{dt_b}{d\tau}, \quad (10)$$

де P_b - потужність повітряного нагрівального елементу, Вт; k_o - коефіцієнт тепловіддачі через огорожі, Вт/м² °С; F_o - площа тепловіддачі огорожі, м²; $C_b m_b$ - питома теплоємність і маса повітря у вермикультивацийній споруді, Дж/кг °С, кг; R_o - опір теплопередачі через огорожі, °С/Вт.

Якщо скласти рівняння (7) і (10), то отримаємо рівняння теплового балансу для вермикультивацийної споруди в цілому:

$$P_c + P_b = \frac{t_c - t_r}{R_c} + \frac{t_c - t_r}{R_{cr}} + C_r m_r \frac{dt_r}{d\tau} + C_b m_b \frac{dt_b}{d\tau}, \quad (11)$$

В усіх рівняннях балансу теплоти в культивацийній споруді (8)-(11) приймалось середнє значення температури субстрату, що дещо перекручує енергетичні розрахунки, особливо в неусталених режимах роботи споруди, тим паче, що взимку товщина субстрату повинна бути не менше 30 см. Усунути вказаний недолік можна, розбивши шар субстрату на декілька горизонтальних

шарів товщиною 5-6 см, приймаючи, що кожний з них має однакову температуру по всій споруді.

Тоді рівняння теплового балансу для перших (бетонна подушка) і-х шарів та повітря вермикультивацийної споруди буде

$$P = \frac{t_n - t_r}{R_{c1}} + \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R_{c(1-2)}} + C_c m_c \frac{dt_{cl}}{dt}; \quad (12)$$

$$\frac{t_n - t_B}{R_{cB}} = \frac{t_B - t_H}{R_0} + C_0 m_B \frac{dt_B}{dt}, \quad (13)$$

$$\frac{t_H - t_B}{R_{cB}} = \frac{t_B - t_H}{R_0} + C_B m_B \frac{dt_B}{dt}, \quad (14)$$

Розв'язок диференціальних рівнянь (12) - (14) на ЕОМ дає можливість отримати розподіл температур по глибині субстрату при різній потужності нагрівальних елементів для секції лож (25 шт.) (рис. 2).

Рис. 2. Розподіл температур за глибиною субстрату вермикультивацийної споруди при різних потужностях нагрівальних елементів секції лож

Добові витрати електричної енергії для секції лож вермикультивацийної споруди в стаціонарному тепловому режимі дорівнюють

$$W_{доб} = \left(\frac{t_n - t_r}{R_{c1}} + \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R_{c(1-2)}} \right) 24. \quad (15)$$

На рис. 3 наведено залежність добових витрат електроенергії на вермикультивацийну споруду з плівковим покриттям від температури і

швидкості руху зовнішнього повітря.

Рис. 3. Залежність добових витрат електричної енергії секції лож від температури і швидкості руху зовнішнього повітря для вермикультивативної споруди з плівковим покриттям

Витрати електроенергії можна значно знизити, застосовуючи різні засоби утеплення вермикультивативних споруд: солом'яні мати, паперові і поролонові покривала. Економія електричної енергії при цьому буде

$$\Delta W = \frac{R_{\text{теп}}}{T} T, \quad (16)$$

де $R_{\text{теп}}$ - опір теплопередачі через огорожу з утеплювачем, °C/Вт; T - тривалість використання утеплювача, год. Енергетичні витрати на утеплювач дорівнюють

$$E_{\text{теп}} = \frac{C_{\text{теп}}}{T}, \quad (17)$$

де $C_{\text{теп}}$ - питомі енерговитрати на утеплювач, ГДж/тис.м²; F - площа секції лож, м²; $T_{\text{с}}$ - строк служби утеплювача, год.

Тоді економію енергетичних витрат можна визначити за формулою

$$\Delta E = \frac{\Delta W C_{\text{ес}}}{10^3} - \frac{C_{\text{теп}} F T}{10^3 T_{\text{с}}} = \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) C_{\text{ес}}}{10^3 (R_{\text{о}}^* - R_{\text{о}})} - \frac{C_{\text{теп}} F T}{10^3 T_{\text{с}}}, \quad (18)$$

де $C_{\text{ес}}$ - енергетичний еквівалент електричної або інших видів енергії, ГДж/тис.кВт·год.

Прийнявши $\Delta E = 0$, визначимо критичну різницю температур всередині

вермикультиваційної споруди та зовнішньої, починаючи з якої стає енергетично ефективно застосовувати утеплювачі

$$t_{\text{в}} - t_{\text{н}} = \frac{(R_{\text{с}}^* - R_{\text{с}}) C_{\text{у}} F}{C_{\text{ее}} T_{\text{с}}} \quad (19)$$

Рис. 4. Номограма для визначення критичної різниці температур всередині і зовні вермикультиваційної споруди при якій доцільно використовувати утеплювач

Рівняння (19) дає можливість побудувати номограму (рис. 4) для визначення, при якій різниці температур всередині і зовні вермикультиваційної споруди доцільно використовувати утеплювачі.

Вихідними даними для номограми є:

- а) питомі енерговитрати на утеплювач $C_{\text{у}}$, ГДж/тис.м²;
- б) енергетичний еквівалент електроенергії або інших видів теплової енергії, ГДж/тис.кВт-год, ГДж/т.
- в) різниця опорів теплопередачі через огорожу без утеплювача і з ним, °C/Вт;
- г) строк служби утеплювача $T_{\text{с}}$, років.

Не менш суттєвий вплив на енергетичну ефективність вермикультуваційної споруди має співвідношення потужностей субстратних і повітряних нагрівальних елементів. Як відомо, температура субстрату задається технологією

вермикультивування і повинна підтримуватись на постійному рівні. Температура повітря у вермикультиваційній споруді залежить від умов зовнішнього середовища та співвідношення потужностей субстратних і повітряних нагрівальних елементів ($k = P_c/P_n$) і може бути визначена при спільному розв'язку рівнянь (109) і (111):

$$t_n = \frac{t_c + k t_{св} + t_0}{k + 1 - k} \quad (20)$$

На основі рівнянь (20), (6) і (5) на рис. 5 і 6 наведені залежності температури повітря і добових витрат електроенергії від співвідношення потужностей субстратного та повітряного нагрівальних елементів. Аналіз даних залежностей показує, що добові витрати електричної енергії стабілізуються і набувають мінімального значення при співвідношенні $k > 2-3$. Так, за відсутності повітряного обігріву вермикультиваційної споруди ($k = 0$) витрати електроенергії зростають більше, ніж у 2,5 рази порівняно з системою обігріву, де $k = 2$

Рис. 5. Залежність температури повітря вермикультиваційної споруди від співвідношення потужностей субстратного і повітряного нагрівальних елементів.

З врахуванням вищевикладеного проілюструємо застосування моделі і пакету прикладних програм на прикладі розрахунку балансу вермикультиваційної споруди, що використовується на комплексі з відгодівлі молодняку ВРХ на 12 тис. скотомісць. Структура питомих витрат енергетичних ресурсів на вермивиробництво згідно з рівнянням (1) наведені на рис. 7.

Рис. 6. Залежність добових витрат електроенергії на обігрів вермикультиваційної споруди від співвідношення потужностей субстратного і повітряного нагрівальних елементів.

Рис. 7. Діаграма потоків енергетичного балансу вермивиробництва

При складанні діаграми покладалось, що енерговміст твердої фракції ефлюента і витрати на його доставку ($E_{эф}$), взяті з діаграми потоків енергетичного балансу БЕУ, вже враховані на попередніх стадіях обробки, а тому тут не враховуються. Тоді загальні витрати енергетичних ресурсів будуть становити

$$E_{24г}^{здр} = E_{ср} + E_{ср} + E_{ср} + E_{ср} \quad (21)$$

Вихідними корисними продуктами вермивиробництва є біомаса черв'яків і

біогумус. Враховуючи, що оптимізація мікроклімату вермикультиваційної споруди завдяки використанню комбінованого субстратно-повітряного електрообігріву дозволяє збільшити в 1,5-2,0 рази вихід продукції, коефіцієнт біоенергетичної ефективності вермивиробництва дорівнює $\eta_{\text{БВ}}^{\text{РР}} = 0,671$, що на 11,6 % вище, ніж при традиційному відкритому вермикультивуванні.

Висновки і перспективи. У результаті проведених досліджень встановлено, що суттєвий вплив на енергетичну ефективність вермикультураційної споруди має співвідношення потужностей субстратних і повітряних нагрівальних елементів. Добові витрати електричної енергії стабілізуються і набувають мінімального значення при співвідношенні $k > 2-3$.

Список літератури

1. Новітні технології біоенергоконверсії. Монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетука, [та інш.]. - К.: Аграр Медіа Груп, 2010. – 326 с.
2. Чміль А. І. Енергетична ефективність і екологічна безпека замкнутих еколого-біотехнічних систем в тваринництві / А. І. Чміль: Монографія. – К.: ЦК «Компринт», 2015. – 163 с.
3. Чміль А. І. Дослідження енергетичної досконалості біотехнічних систем у тваринництві //Науковий вісник НУБіП України. - 2015. – Вип. 209, ч.2.- С.58-63.

References

1. Blium, Ia. B., Heletukha, H.H. , at al..] (2010). Novitni tekhnolohii bioenerhokonversii. Monohrafiia [The latest technologies of bioenergeon conversion]. Kyiv: Ahrar Media Hrup, 326.
2. Chmil, A. I. (2015). Enerhetychna efektyvnist i ekolohichna bezpeka zamknutykh ekoloho-biotekhnichnykh system v tvarynnyystvi [Energy efficiency and ecological safety of closed ecological and biotechnical systems in animal husbandry].. Kyiv: «Komprynt», 163.
3. Chmil, A. I. (2015). Doslidzhennia enerhetychnoi doskonalosti biotekhnichnykh system u tvarynnyystvi [Research of energy perfection of biotechnical systems in animal husbandry]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 209 (2), 58-63.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЕРМИКУЛЬТИВИРОВАНИЯ

А. И. Чмиль

Аннотация. В последнее время в связи с ухудшением экологической ситуации и с целью реанимации почв, повышения их плодородия и устойчивости к водной и ветровой эрозии мировая наука и практика обращаются к биологическому земледелию, основанного на исключении или значительном уменьшении применения минеральных удобрений и пестицидов и широком использовании биогумуса - продукта жизнедеятельности дождевых червей.

Эффективность процессов преобразования энергии при биоконверсии органических отходов в биогумус и белковый корм рассмотрен на примере защищенной культивационных сооружения наземного типа, позволяет круглогодично получать ценную продукцию для сельского хозяйства. Проанализированы составляющие уравнения энергетического баланса вермипроизводства и определена степень их влияния на коэффициент биоэнергетической эффективности.

Для обеспечения оптимального микроклимата в вермикультивационном сооружении необходимо количественная оценка параметров температурно-влажностного режима. Решение этой задачи возможно на основе уравнения теплового баланса, составленного для наиболее тяжелых температурных условий в вермикультивационном сооружении. Такие условия имеют место в зимний период эксплуатации.

Расходы электроэнергии можно значительно снизить, применяя различные средства утепления вермикультивационных сооружений: соломенные маты, бумажные и поролоновые покрывала.

Не менее существенное влияние на энергетическую эффективность вермикультуваационного сооружения имеет соотношение мощностей субстратных и воздушных нагревательных элементов. Как известно, температура субстрата задается технологией вермикультивирования и должна поддерживаться на постоянном уровне. Температура воздуха в вермикультивационном сооружении зависит от условий внешней среды и соотношение мощностей субстратных и воздушных нагревательных элементов

Ключевые слова: *вермикультивирование, энергопотери, животноводческие отходы*

RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY VERMICULTURAL PROCESS

A. Chmil

Abstract. *Recently, due to the deterioration of the ecological situation and in order to rehabilitate soils, increase their fertility and resistance to water and wind erosion, world science and practice are turning to biological agriculture, based on the*

elimination or significant reduction of the use of mineral fertilizers and pesticides and the widespread use of biohumus - a product of the life of rainworms.

Efficiency of the processes of energy conversion during bioconversion of organic waste in biohumus and protein feed is considered on the example of a protected cultivating structure of the ground type, which allows year-round to receive valuable products for agriculture.

The components of the equation of the energy balance of vermiculture are analyzed and the degree of their influence on the bioenergy efficiency coefficient is determined.

To ensure optimal microclimate in a vermicular plant, quantitative assessment of the parameters of the temperature-humidity regime is required. The solution of this problem is possible on the basis of the equation of thermal balance, compiled for the most severe temperature conditions in a vermicultivating structure. Such conditions take place during the winter period of its exploitation.

Electricity costs can be greatly reduced by using different means of insulation of vermiculture plants: straw mats, paper and foam blankets. No less significant effect on the energy efficiency of the vermiculturable structure is the ratio of power substrate and airheating elements. As is known, the temperature of the substrate is determined by the technology of vermicultivation and should be maintained at a constant level. The air temperature in the vermicular cultivating plant depends on the conditions of the environment and the ratio of the capacities of substrate and air heating elements

Key words: *vermicultivation, energy consumption, livestock wastes*