

УДК 628.477.3

DOI:

## ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ОТРИМАННЯ ДОБРИВ З ТРІСКИ ЗРІЗАНИХ ГІЛОК ПЛОДОВИХ ДЕРЕВ

Караєв О. Г., д. т. н.,

Бондаренко Л. Ю., к. т. н.,

Стручаєв М. І., к. т. н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет  
ім. Д. Моторного*

Тел. (098) 846-00-56

**Анотація** – стаття присвячена проблемі підвищення якості добрив із зрізаних гілок плодкових дерев, що дозволяє мінімізувати ризики для навколишнього середовища. Наведено обґрунтування параметрів процесу перетворення біомаси тріски у буртах. Розроблено термодинамічну модель процесу буртового способу компостування тріски плодової деревини, яка створює підстави для розроблення технології переробки ЗГП у високоякісне добриво. Така технологія буде відповідати вимогам стандарту Global G.A.P. та сприяти раціональному використанню природних ресурсів.

**Ключові слова** – термодинамічна модель, питомі втрати, буртовий спосіб, компост, сертифікація продукції.

*Постановка проблеми.* Шляхом постачання плодової продукції на зовнішній ринок є процедура сертифікації всіх процесів виробництва продукції за стандартом GLOBALG.A.P. [1]. Даним стандартом визначено, що відходи компостують і застосовують для поліпшення ґрунту в садах, а методи компостування мають гарантувати відсутність ризиків для навколишнього середовища.

Так, у базовому модулі даного Стандарту AF.6 «Ліквідація відходів і контроль забруднення навколишнього середовища» у пункті 6.2.4. визначено таку контрольну точку: «Організована лі переробка і компостування органічних відходів...», а критерієм відповідності даної контрольної точки є те, що відходи компостуються і застосовуються для поліпшення ґрунту в садах, а методи компостування мають гарантувати відсутність ризиків для навколишнього середовища [1]. Для отримання якісного і безпечного компосту, який можливо застосовувати у якості органічного добрива в садах, необхідно розробити термодинамічну модель процесу перетворення відходів у добрива [2].

*Аналіз останніх досліджень.* Одним із видів органічних відходів у садівництві є зрізані гілки плодкових дерев (ЗГП), які відносяться до відновлюваного ресурсу (ВР). Згідно попередньої оцінки їх біомаса в Україні складає близько 784 тис. т/рік [3]. На даний час утилізацію ЗГП здійснюють переважно спалюванням, що призводить до негативних змін у біосфері. А за критерієм, який визначає Стандарт GLOBALG.A.P. передбачено наявність науково-обґрунтованого процесу поводження з відходами, тобто має бути впроваджена технологія їх перероблення на тріску, компостування в буртах і використання отриманого компосту (добрива) для поліпшення ґрунту в садах. Процедура управління відходами і контроль забруднення навколишнього середовища повинні бути документованою.

Процес компостування в буртах знайшов висвітлення у дослідженнях, присвячених розробці технологічної схеми [4], параметрів компостування [5], режимів компостування [6] та термодинамічних процесів при компостуванні [7]. Запропоновано також використання рослинної сировини для виробництва біогазу з розрахунком технологічних та конструктивних характеристик біогазгенератора [8]. Теплотехнічні розрахунки та процеси теплопередачі у загальному вигляді висвітлено досить повно [9], але спеціальні роботи, присвячені тепловим процесам при компостуванні тріски зрізаних гілок плодкових дерев відсутні.

Проведений аналіз досліджень по розробці технології приготування компостів з відходів садівництва дозволив встановити наступне:

- недостатньо вивчені питання компостування відходів садівництва;
- використання деревних відходів садівництва (тирси, тріски) стримується відмінністю технологічних властивостей їх компонентів;
- відсутня термодинамічна модель отримання добрив з тріски зрізаних гілок плодкових дерев.

*Формування цілей статті (постановка завдання).* Підвищити якість добрива із ЗГП та мінімізувати ризики для навколишнього середовища шляхом обґрунтування параметрів процесу перетворення біомаси тріски у буртах.

*Основна частина.* Термодинамічну модель процесу буртового способу компостування тріски плодової деревини можна розрахувати спільним розв'язком рівнянь теплового балансу і теплопередачі.

У відповідності до [2] рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q^{mб} = m_1 \cdot c_1 \cdot (T_{2m} - T_{1m}) = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_{2k} - T_{1k}), \quad (1)$$

де  $Q^{mб}$  – кількість теплоти в тепловому балансі, Дж;

$m_1$  – маса тріски, кг;

$m_2$  – маса готового компосту, кг;

$c_1$  – теплоємність тріски, Дж/(кг·К);

$c_2$  – теплоємність готового компосту, Дж/(кг·К);

$T_{1m}, T_{1к}$  – відповідно початкові температури тріски і компосту, К;

$T_{2m}, T_{2к}$  – відповідно кінцеві температури тріски і компосту, К;

Разом з тим рівняння теплопередачі має вигляд [2]:

$$Q^{mn} = k \cdot F_6 (T_{6\text{сер}} - T_{\text{навк.сер}}) \cdot \tau, \quad (2)$$

де  $Q^{mn}$  – кількість теплоти під час теплопередачі від тріски в бурті до навколишнього середовища, Дж;

$k$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F_6$  – площа поверхні бурта, м<sup>2</sup>;

$T_{6\text{сер}}$  – середня температура тріски в бурті, К;

$T_{\text{навк.сер}}$  – середня температура навколишнього середовища, К;

$\tau$  – час трансформації тріски, с.

Оскільки, в реальному процесі, трансформація тріски супроводжується втратою енергії, то рівняння теплового балансу (1) необхідно представити відносно корисної енергії готового компосту у вигляді:

$$Q_2 = Q_1 - Q_3 - Q_4 - Q_5 - Q_6, \quad (3)$$

де  $Q_2$  – кількість корисної енергії в готовому компості, Дж;

$Q_1$  – вхідна кількість енергії тріски, Дж;

$Q_3$  – втрати енергії від хіміко-біологічних реакцій, Дж;

$Q_4$  – втрати енергії від нерівномірності подрібнення тріски, Дж;

$Q_5$  – втрати енергії з газоподібними продуктами, Дж;

$Q_6$  – втрати теплової енергії в навколишнє середовище, Дж.

Для зручнішого розв'язання рівняння теплового балансу відносно корисної енергії готового компосту (3) кількість теплоти в тепловому балансі доцільно привести до питомих величин:

$$q_i = \frac{Q_i}{m_i}$$

Тоді

$$q_2 = q_1 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (4)$$

де  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  – відповідні питомі величини складових теплового балансу, Дж/кг;

Найбільший інтерес має величина  $q_3$  ( $Q_3$ ) – кількість теплоти, яка виділяється у результаті життєдіяльності мікроорганізмів, що призводить до саморозігрівання субстрату в бурті і прискоренню його переробки. Саме цю величину необхідно підставляти в ліву частину

рівняння теплопередачі (1), вирішивши його відносно  $F_6$ , знайдемо площу поверхні бурта [10]:

$$F_6 = \frac{Q_3}{k \cdot (T_{\text{ср}} - T_{\text{нс}}) \cdot \tau}. \quad (5)$$

А довжину бурта, яка дозволить забезпечити оптимальну роботи бактерій можна визначити за формулою [10]:

$$L_6 = \frac{Q_6}{(k_\ell + k_{\text{сф}}) \cdot (T_{\text{ср}} - T_{\text{нс}}) \cdot \tau + 2R_2}, \quad (6)$$

де  $R_2$  – радіус середнього шару бурта, м.

З теорії теплообміну [11, 12] відомо, що ця площа буде різною для буртів з різними формами і найменшою буде для сфери (далі – циліндра). При існуючих засобах механізації формування буртів, їх зручніше представляти у вигляді напівциліндра із сферичними торцевими частинами (рис.1). Тоді можна уточнити площу бурту  $F_6$  з урахуванням формул для визначення коефіцієнтів теплопередачі для циліндричної  $k_\ell$  та сферичної  $k_{\text{сф}}$  частини бурта.

Схема для визначення теплових втрат в процесі компостування для циліндричної і напівсферичної частин бурта графічно представлена на рис. 1, а схема процесу теплопередачі в циліндричній частині бурта – на рис. 2.

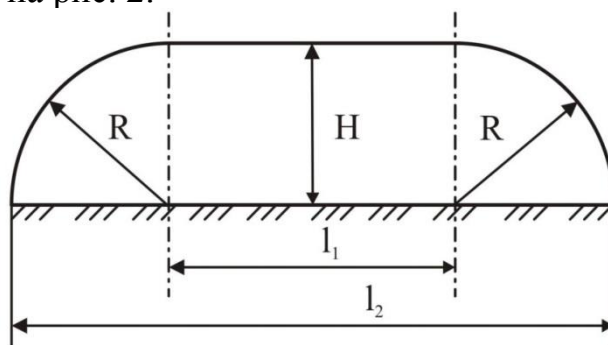


Рис. 1. Схема для визначення теплових втрат в процесі компостування тріски для циліндричної і напівсферичної частин бурта:  $H$  – висота циліндричної частини бурта;  $R$  – радіус сферичної частини бурта;  $l_1$  – довжина циліндричної частини бурта;  $l_2$  – загальна довжина бурта

Значення коефіцієнта теплопередачі  $k_\ell$  ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ) для циліндричної частини бурта визначається за формулою [10]:

$$k_\ell = \left( \sum \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2\alpha R_2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

де  $\lambda_i$  – коефіцієнти теплопровідності шарів компосту,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$R_1, R_2$  – радіуси середнього і зовнішнього шарів, м;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі поверхні шару компосту, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

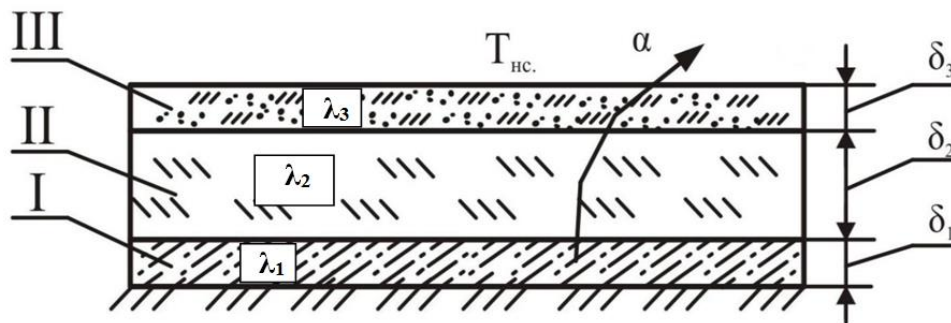


Рис. 2. Схема процесу теплопередачі в циліндричній частині бурта: I – теплоізолюючий шар від поверхні ґрунту; II – шар, в якому відбуваються реакції; III – теплоізолюючий шар від повітря;  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – товщини шарів;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – коефіцієнти теплопровідності шарів компосту

Для торцевих напівсферичних частин бурта значення коефіцієнта теплопередачі  $k_{сф}$  визначається за формулою [10]:

$$k_{сф} = \left( \sum \frac{1}{4\lambda_i} \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{4\alpha_2 R_2^2} \right)^{-1}, \quad (8)$$

де  $\lambda_i$  – коефіцієнти теплопровідності, Вт/(м·К);

$R_1, R_2$  – радіуси бурта, м;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі поверхні бурта, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Загальне значення радіусу бурта  $R$  можна знайти при наявності значень:

- товщини нижнього теплоізолюючого шару;
- товщини шару, в якому відбуваються реакції;
- товщини верхнього теплоізолюючого шару.

За допомогою розробленої методики компостування було розглянуто схему теплоізоляції бурта по шарам і визначено ефективність компостування  $\eta_{еф}$  за формулою [10], яка дозволяє розрахувати висоту бурта  $H$  та радіус  $R$  для забезпечення життєдіяльності бактерій:

$$\eta_{еф} = \frac{q_2}{q_1} \cdot 100\% = \left( 1 - \frac{q_3 + q_4 + q_5 + q_6}{q_1} \right) \cdot 100\%, \quad (9)$$

де  $q_1$  – енергія плодової деревини, МДж/кг;

$q_2$  – енергія отриманого добрива, МДж/кг ;

$q_3$  – втрати енергії від хіміко-біологічних реакцій в процесі компостування, МДж/кг;

$q_4$  – втрати енергії від неоднорідності подрібнення тріски, МДж/кг;

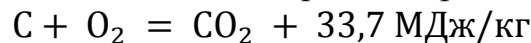
$q_5$  – втрати енергії з газоподібними продуктами, МДж/кг;

$q_6$  – втрати енергії в навколишнє середовище, МДж/кг.

Визначимо складові питомих втрат енергії в процесі компостування. Для чого, по-перше, визначимо елементний склад деревини відповідно до [13]. Тоді, при вологості 50% в 1 кг тріски міститься 250 грам вуглецю, а на 4-й стадії переробки, коли загальна маса складає 247 грам при вологості 20% буде 98,8 грам вуглецю. Тобто в реакцію вступило:

$$250 - 98,8 = 151,2 \text{ грам.}$$

Тому, відповідно до стехіометричного рівняння маємо:



Тоді, питомі втрати енергії від хіміко-біологічних реакцій  $q_3$ :

$$q_3 = 33,7 \cdot 0,1512 = 5,096196 \text{ МДж/кг.}$$

Визначимо втрати енергії від нерівномірності подрібнення вхідної сировини  $q_4$ . Для цього використаємо результати експериментального компостування гілок яблуні з розщепленням та без розщеплення [14], які наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Втрати маси деревиною при подрібненні її на тріску розміром від 30 мм до 50 мм

Величина	Рік компостування			
	1 й рік	2 й рік	3 й рік	4 й рік
Втрата маси без розщеплення, $\Delta m_1$ , кг	0,092	0,400	0,601	0,714
Втрата маси з розщепленням, $\Delta m_2$ , кг	0,135	0,447	0,601	0,753
Частка маси не переробленої деревини, $\Delta$	0,043	0,047	0	0,039

Тоді питомі втрати енергії від нерівномірності подрібнення вхідної сировини складатимуть:

$$q_4 = q_1 \cdot \Delta, \quad (10)$$

де  $q_1$  – вхідна кількість енергії тріски,  $q_1 = 10,2$  МДж/кг [2];

$\Delta$  – частка маси непереробленої деревини.

За перший рік компостування питомі втрати енергії від нерівномірності подрібнення будуть дорівнювати:

$$q_4 = 10,2 \cdot 0,043 = 0,4386 \text{ МДж/кг.}$$

Результати розрахунків втрати енергії від нерівномірності подрібнення у наступних роках наведено у табл. 2.

При компостуванні газоподібні продукти складають 0,040625 частини, або 4,1% від загальної маси. Тоді, питомі втрати енергії з

газоподібними продуктами  $q_5$  становитимуть:

$$q_5 = q_1 \cdot \Delta, \quad (11)$$

$$q_5 = 10,2 \cdot 0,040625 = 0,414375 \text{ МДж/кг}$$

Таблиця 2 – Втрати енергії від нерівномірності подрібнення ЗГП

Величина	Рік компостування			
	1 й рік	2 й рік	3 й рік	4 й рік
Маса не переробленої деревини $\Delta$ , кг	0,043	0,047	0	0,039
Втрати енергії $\Delta q_4$ , МДж/кг	0,4386	0,4794	0	0,3978

При компостуванні втрати енергії в навколишнє середовище дорівнюють 10-14,1% від загальної енергії. Тоді, питомі втрати енергії в навколишнє середовище  $q_6$  становитимуть:

$$q_6 = q_1 \cdot \Delta, \quad (12)$$

$$q_6 = 10,2 \cdot 0,141 = 1,4382 \text{ МДж/кг}$$

Визначимо питому кількість корисної енергії  $q_2$  в готовому компості за формулою (4):

$$\begin{aligned} q_2 &= 10,2 - 5,096196 - 0,4386 - 0,414375 - 1,4382 = \\ &= 2,8126 \text{ МДж/кг} \end{aligned}$$

Отримавши значення питомих втрат енергії в процесі компостування, розрахуємо ефективність переробки тріски в буртах  $\eta_{\text{еф}}$  за формулою (8):

$$\eta_{\text{еф}} = \left( 1 - \frac{5,096196 + 0,4386 + 0,414375 + 1,4382}{10,2} \right) \cdot 100\% = 27,6\%.$$

З цього випливає, що підвищити ефективність процесу компостування можна шляхом зменшення таких питомих втрат, як:

–  $q_4$  – втрати енергії від нерівномірності подрібнення вхідної сировини можна значно зменшити використовуючи більш ефективні методи подрібнення рослинної сировини, які дозволять збільшити питому поверхню, яка приймає участь у біохімічних процесах;

–  $q_5$  – втрати енергії з газоподібними продуктами життєдіяльності бактерій можна зменшити, використовуючи поліетиленовий полог;

–  $q_6$  – втрати теплоти в навколишнє середовище значно зменшити укриваючи бурти матеріалом з низьким коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_i$  (наприклад солома, листя тощо).

Забезпечення визначеної ефективності переробки тріски в буртах може бути досягнуто за такими параметрами бурта: довжина бурта  $L_6$  має дорівнювати 6,4 м, а його площа поверхні  $F$  має бути 32,2 м<sup>2</sup>. При таких параметрах бурта в шарі II (рис. 2) утворюється

температура +27°C для оптимальної роботи мезофільних бактерій та +50°C для термофільних.

*Висновки.*

1. Отримана термодинамічна модель буртового способу компостування тріски плодової деревини дозволяє визначити температурний режим компостування, який має бути забезпечений відповідними геометричними параметрами бурта (довжиною та площею поверхні бурта).

2. Для зниження втрати енергії від неоднорідності тріски та скорочення часу компостування, встановлено, що гілки необхідно подрібнювати на тріску довжиною до 10 мм з наявністю повздовжнього розщеплення, що збільшує її контактну поверхню на 50-59%.

3. Для підвищення енергетичної ефективності способу компостування тріски в буртах необхідно провести наукові дослідження щодо зменшення втрат енергії з газоподібними продуктами життєдіяльності бактерій та в навколишнє середовище.

4. Наведена термодинамічна модель створює підстави для розроблення технології переробки ЗГП у добриво; така технологія буде відповідати вимогам стандарту Global G.A.P., а саме: сприяти раціональному використанню природних ресурсів, мінімізувати ризики розповсюдження хвороб і бур'янів та підвищити показники родючості ґрунтів за рахунок застосування отриманого добрива.

*Література:*

1. *Global G.A.P.* Интегрированная система управления сельскохозяйственным производством. Растениеводство. Фрукты и овощи. Контрольные точки и критерии соответствия. [Действует с 01.07.2017]. Кельн, 2017. 163 с.

2. *Караєв О. Г.* Наукові основи створення механізованих технологічних комплексів для виробничих систем розсадництва плодкових культур: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, 2017. 41 с.

3. *Караєв О. Г., Бондаренко Л. Ю.* Визначення та опис технічної енергетичної системи з використання відновлювальних ресурсів плодкових насаджень // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2019. Вип. 19, т. 2. С. 192-199.

4. Агрокомплексу екологически безопасные удобрения: рекомендации / *В. П. Коваленко* и др. Краснодар: КГАУ, 1998. 17 с.

5. *Рожко А. А.* Компостирование древесно-растительных отходов с учетом факторов, влияющих на параметры компостирования бурта // Лесохозяйственная информация. 2009. № 1/2. С. 31-34.



6. Гуляев Н. Ф. Аэрационный, влажностный и тепловой режимы при биотермических процессах обеззараживания твёрдых отбросов // Науч. труды АКХ. 1962. Вып. 14. С. 117-134.

7. Гуляев Н. Ф., Мирный А. Н. Термодинамические процессы в установках для компостирования мусора // Науч. труды АКХ. 1970. Вып. 67, № 2. С. 17-24.

8. Стручаев М. І. Дослідження технологічних та конструктивних характеристик біогазгенератора // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2010. Вип. 10, т. 3. С. 194-199.

9. Дідур В. А., Стручаев М. І. Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві: навч. посібник / за ред. В. А. Дідюра. Київ: Аграрна освіта, 2008. 233 с.

10. Караев О. Г., Бондаренко Л. Ю., Стручаев М. І. Використання відновлюваних ресурсів садівництва за вимогами стандарту GLOBALG.A.P. // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. 2019. Вип. 7. С. 76-83.

11. Лозановская И. Н., Орлов Д. С., Попов П. Д. Теория и практика использования органических удобрений. Москва: Агропромиздат, 1987. 96 с.

12. Теория тепломассообмена / С. И. Исаев и др. Москва, 1979. 495 с.

13. Теплотворность древесины. URL: <http://tehnopost.kiev.ua.13-plotvornost-drevesiny.html> (дата звернення: 28.07.2019).

14. Линник Н. К., Караев А. И. Экологическое и энергетическое обоснование эффективности утилизации плодовой древесины // Биоконверсия органических отходов и охрана окружающей среды: материалы 4-Междунар. конгресса. Киев: НАУ, 1996. С. 188-190.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУЧЕНИЯ УДОБРЕНИЙ ИЗ ЩЕПЫ СРЕЗАННЫХ ВЕТОК ПЛОДОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ

Караев А. И., Бондаренко Л. Ю., Стручаев М. И.

**Аннотация** – статья посвящена проблеме повышения качества удобрений из срезанных веток плодовых деревьев, что позволяет минимизировать риски для окружающей среды. Приведено обоснование параметров процесса преобразования биомассы трески в буртах. Разработана термодинамическая модель процесса буртового способа компостирования трески плодовой древесины, которая создает основы для разработки технологии переработки древесины в высококачественное

**удобрение. Такая технология будет отвечать требованиям стандарта GlobalG.A.P. и способствовать рациональному использованию природных ресурсов.**

## **THERMODYNAMIC MODEL OF PRODUCING FERTILIZERS FROM CHIPS OF CUTTED BRANCHES OF FRUIT TREES**

O. Karaiev, L. Bondarenko, M. Struchaiev

### *Summary*

The article presents a thermodynamic model of the process of the bunch method of composting fruit tree chips, the essence of which is the general solution of the equations of heat balance and heat transfer. A scheme for determining heat loss in the process of composting wood chips, which consists of a cylindrical and hemispherical parts of the collar and a diagram of the heat transfer process in the cylindrical part of the collar in layers, from which it is clear that thermal reactions occur in the middle layer, is considered. The results of experimental studies on the determination of the specific energy loss components in the composting process are presented and the potential energy efficiency of the a bunch composting method is calculated, which amounted to 27,6%. Such composting efficiency can be achieved in a bunch with the following parameters: layer thickness from the soil surface 0,1 m, chip layer thickness 1,2 m, layer thickness from air 0.3 m, a bunch length 6,4 m and surface area 32,2 m<sup>2</sup>. With such parameters, the bunch energy losses due to heat transfer to the environment do not exceed the calculated energy losses. At the same time, the optimum temperature regime is formed in the bunch layer where chip transformation processes take place: for mesophilic bacteria, the temperature is 27°C, and for thermophilic bacteria it is 50°C. It is proved that the specific amount of useful energy in the finished compost is 2,9 MJ/kg, and to reduce energy loss from chip heterogeneity and shorten composting time, the branches must be crushed to particles up to 10 mm long with the presence of longitudinal splitting, which increases its contact surface by 50-59%. It is noted that the implementation of the a bunch method of composting cod according to the given model will meet the requirements of the Global G.A.P. standard, namely: to promote the rational use of natural resources, minimize the risks of the spread of diseases and weeds, and increase soil fertility in gardens through the use of the obtained fertilizer.