

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-8>

УДК 631.333:631.172

В. П. Кувачов, д-р техн. наук

В. М. Дружич, інженер

С. О. Шевченко, інженер

К. О. Зеленов, інженер

С. А. Інува, інженер

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: volodymyr.kuvachov@tsatu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-5762-256X

ORCID: 0009-0007-5361-5921

ORCID: 0009-0007-3371-1262

ORCID: 0009-0001-1235-6341

МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОЦЕСУ ПІДБИРАННЯ І ЗМІШУВАННЯ БІОМАСИ ДЛЯ ОРГАНІЧНИХ ДОБРИВ

Анотація. Актуальність досліджень зумовлена відсутністю механіко-технологічних основ для розробки спеціалізованого підбирача-змішувача біомаси для малих фермерських господарств, що призводить до високих витрат на виробництво компосту. Мета – підвищення техніко-експлуатаційних показників процесу підбирання й змішування біомаси шляхом обґрунтування конструктивно-технологічної схеми та параметрів агрегата. За результатами досліджень розроблено технологічну схему приготування органомінерального компосту та запропоновано конструкцію навантажувача-змішувача з дозатором мінеральних добрив. Установлено, що кінематичне узгодження швидкостей шнека та дозувального вала забезпечує стабільне й рівномірне перемішування, підвищує якість компосту та оптимізує енергоспоживання.

Ключові слова: сталий розвиток сільського господарства, підтримка малих фермерів, технічні інновації в аграрному секторі, агроінженерія.

Постановка проблеми. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності відновлення родючості ґрунтів є використання компостування як агротехнологічного процесу [1; 2]. Компост утворюється внаслідок мікробіологічного розкладу органічних компонентів і становить собою складну багатокомпонентну систему, насичену поживними речовинами. Введення до органічної маси мінеральних добрив дає змогу формувати органомінеральний компост, який характеризується підвищеною агрохімічною ефективністю та зменшеним обсягом внесення порівняно із суто органічними субстратами. Є декілька методів приготування компосту, зокрема шаровий, осередковий та майданчиковий, проте їх практичне впровадження ускладнене технологічними обмеженнями сучасного машинного парку [3; 4]. Наявна недостатня номенклатура спеціалізованих машин, висока вартість імпортих аналогів та обмежена продуктивність створюють значні економічні витрати на виробництво одиниці компосту. У цьому контексті розробка й оптимізація параметрів навантажувача-змішувача для органомінерального компосту дає змогу інтегрувати операції завантаження та змішування органічних і мінеральних компонентів, підвищити продуктивність процесу та знизити питомі витрати на одиницю продукції. Водночас вирішення цього завдання потребує подолання наукової проблеми, пов'язаної з відсутністю механіко-технологічних основ функціонування спеціально розробленого підбирача-змішувача біомаси для малих фермерських господарств, що обмежує ефективність використання таких машин у практичних умовах.

Аналіз останніх досліджень. Приготування компосту, зокрема органомінерального, є високотрудомісткою та технологічно складною операцією, оскільки передбачає переміщення значних обсягів посліду, торфу та інших компонентів, а також точне дозування мінеральних



добрив [5]. Для підвищення ефективності процесу та зниження його трудомісткості застосовується механізована техніка, адаптована або спеціально розроблена для приготування компосту. До серійних машин, які використовують у цій сфері, належать, зокрема, ALLU AS 26(38), SEKO, вітчизняний навантажувач ПНД-250А, стаціонарно-пересувний змішувач-завантажувач СЗУ-20, а також пересувні, мобільні та стаціонарні засоби ПЗМ-1,5, ККС-Ф-2, СПУ-40М, ПДТ-1,5 та інші [1–6].

Аналіз наявних технічних засобів демонструє, що, незважаючи на певні дослідження в цій галузі, фізичні процеси, які відбуваються під час змішування компонентів, досліджено недостатньо [7; 8]. Це ускладнює обґрунтування оптимальних параметрів робочих органів навантажувачів-змішувачів, здатних суміщати операції змішування та навантаження одночасно. В умовах сучасного виробництва операції змішування й навантаження зазвичай виконують послідовно різними машинами, що призводить до підвищених витрат і трудомісткості. Об'єднання цих операцій у єдиному агрегаті з одночасним дозуванням мінеральних добрив дає змогу значно оптимізувати процес, зменшити витрати та підвищити продуктивність, що робить розробку й обґрунтування параметрів такого навантажувача-змішувача надзвичайно актуальним завданням.

Процеси змішування та приготування компосту залишаються предметом значного наукового інтересу, проте наявні дослідження не охоплюють досить детально фізичні закономірності взаємодії компонентів, що обмежує можливість використання цих даних для конструювання ефективних робочих органів навантажувачів-змішувачів, які поєднують операції змішування та навантаження.

Мета досліджень полягає в підвищенні техніко-експлуатаційних показників роботи підбирання й змішування біомаси для органічних добрив шляхом обґрунтування його конструктивно-технологічної схеми та параметрів.

Основна частина. Для приготування органомінерального компосту запропонована технологічна схема, за якою на підготовлений майданчик визначених розмірів завозяться торф та лігнін із формуванням торф'яної подушки товщиною 0,25–0,30 м. Надалі укладаються та розрівнюються шари посліду, торфу й соломи, чергуючи їх пошарово. Компостну масу бульдозером формують у штабелі завширшки 4–6 м та заввишки 3–4 м. Для забезпечення однорідності та активного перемішування органомінеральної маси застосовується дискова борона. Внесення мінеральних добрив здійснюється безпосередньо перед навантаженням за допомогою спеціально розробленого навантажувача-змішувача, оснащеного дозатором.

Запропонований навантажувач-змішувач призначений для рівномірного перемішування мінеральних добрив усередині компостної маси під час навантаження. Конструктивно він складається з базової машини, редуктора, закріпленого на рамі, стрічкового гвинта з приводним валом, який отримує рух від вала відбору потужності (далі – ВВП) через ланцюгову передачу, муфту та зірочку. До складу агрегата входять також відвантажувальний транспортер і бункер-дозатор із вивантажувальними отворами та дозувальним валом. Жорсткий кінематичний зв'язок між валом гвинта та дозувальним валом забезпечує синхронне обертання й точне дозування мінеральних компонентів під час переміщення компостної маси, що дає змогу підвищити рівномірність суміші та ефективність технологічного процесу.

Процес змішування та навантаження органомінерального компосту реалізується так. Під час поступального руху трактора стрічковий гвинт живильника (рис. 2 та 3), закріпленого на рамі навантажувача-змішувача, обертається на приводному валу, який отримує рух від вала відбору потужності через муфту, ланцюгову передачу та редуктор, і занурюється в пошарово розкладений бурт компосту. У результаті обертання гвинта частини компостної маси відокремлюються від бурту та переміщуються до вивантажувального транспортера. Жорсткий кінематичний зв'язок між валом гвинта та дозувальним валом забезпечує синхронне обертання й точне дозування мінеральних компонентів під час переміщення компостної маси, що дає змогу підвищити рівномірність суміші та ефективність технологічного процесу.

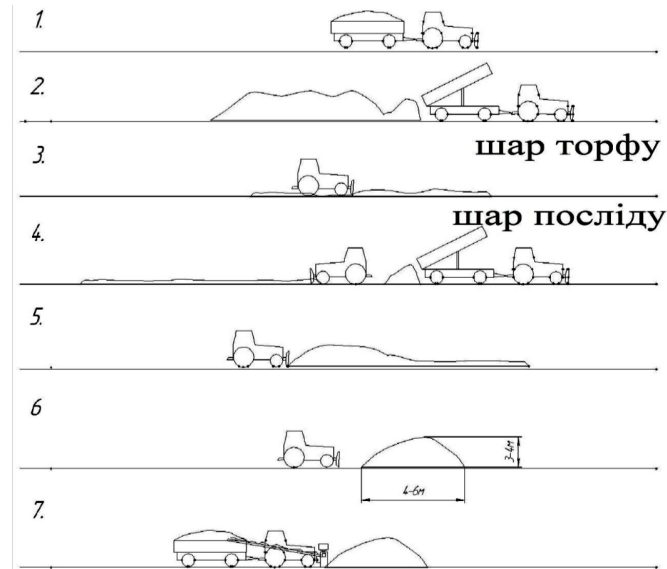


Рис. 1. Схема технологічного процесу приготування та змішування органомінерального компосту з одночасним навантаженням

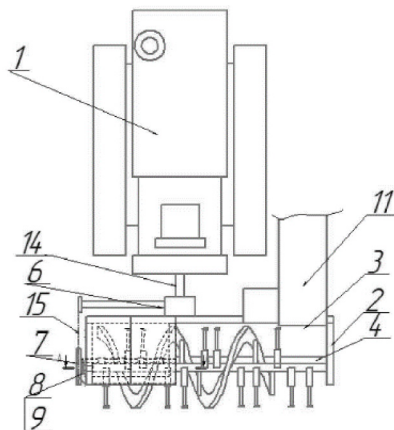


Рис. 2. Схема навантажувача-змішувача органомінерального компосту і його робочих органів:

1 – трактор; 2 – рама; 3 – вивантажувальне вікно; 4 – вал; 5 – стрічковий гвинт; 6 – редуктор; 7 – ланцюг; 8 – муфта; 9 – шестерня; 10 – бункер-дозатор; 11 – вивантажувальний транспортер; 12 – ланцюг; 13 – дозуючий вал; 14 – вал відбору потужності; 15 – ланцюг

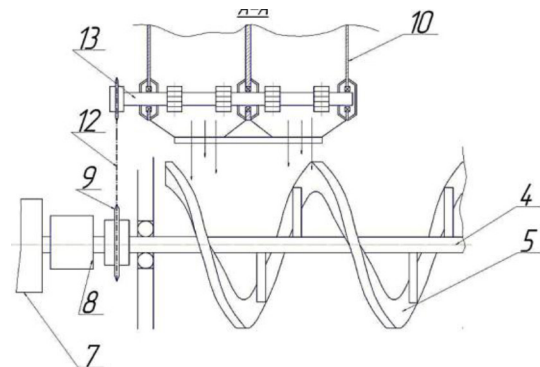


Рис. 3. Схема подання мінеральних добрив до робочого органу навантажувача-змішувача:

матичний зв'язок між валом гвинта та дозувальним валом забезпечує синхронне обертання останнього. Під час обертання дозувального вала в бункері-дозаторі здійснюється точне дозування мінеральних добрив, які надходять у зону дії стрічкового гвинта. У процесі переміщення компосту та мінеральних компонентів гвинтом до вивантажувального транспортера відбувається їх інтенсивне взаємне перемішування, що забезпечує однорідність органомінеральної маси та підвищує ефективність технологічного процесу.

До основних параметрів робочих органів навантажувача-змішувача органомінерального компосту належать режимні характеристики та швидкісні показники. До режимних параметрів належать: швидкість обертання стрічкового гвинта $n_g, \text{хв}^{-1}$, та його кутова швидкість $\omega_g, \text{рад/с}$; швидкість обертання дозувального вала $n_v, \text{хв}^{-1}$, та його кутова швидкість $\omega_v, \text{рад/с}$. До швидкісних показників належать поступальна швидкість навантажувача $v_{н.с.}, \text{м/с}$, та швидкість падіння мінеральних добрив $v_d, \text{м/с}$. Визначення та оптимізація цих параметрів є критично важливими для забезпечення рівномірності змішування компосту та точного дозування мінеральних компонентів.

Конструктивні параметри навантажувача-змішувача органомінерального компосту класифікуються за трьома групами. Для дозувальних та подавальних робочих органів визначають такі характеристики (рис. 4 і 5): ширина (b_{δ}), висота (h_{δ}) та довжина (l_{δ}) бункера; його місткість (V_{δ}); довжина (l_o), ширина (b_o) та кількість (z_o) вивантажувальних вікон; діаметр (D_k) та ширина (B_k) катушок дозувального вала. Окрім того, встановлюються параметри робочих поверхонь катушок, зокрема діаметр (D_{en}), глибина западини (h_{en}), об'єм (V_{en}) та кількість западин (m_{en}). Визначення й оптимізація цих параметрів є необхідними для забезпечення точного дозування мінеральних добрив та ефективного переміщення компостної маси під час роботи.

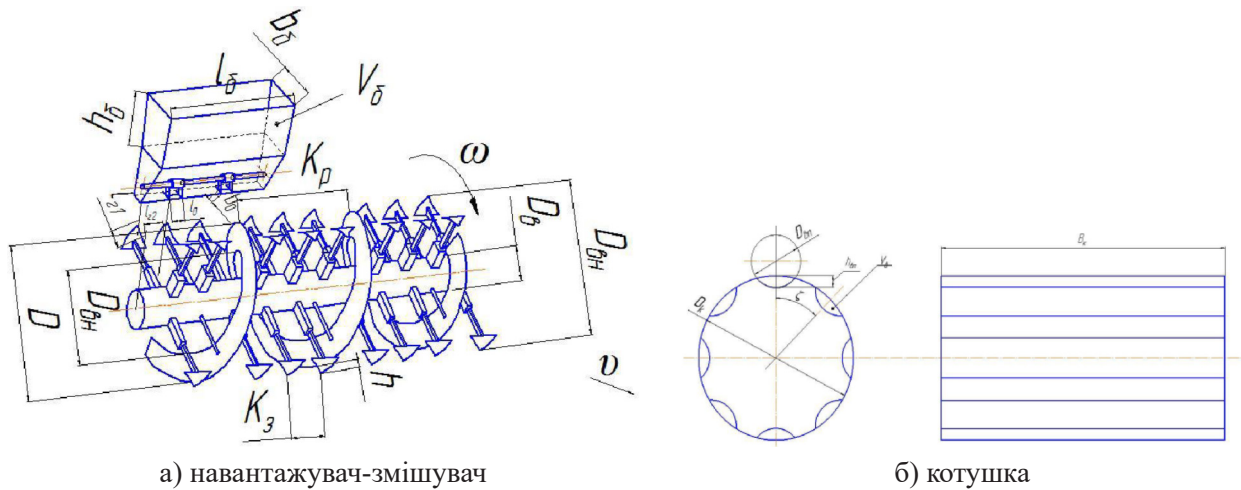


Рис. 4. Параметри робочих органів навантажувача-змішувача

Захоплення компостної маси гвинтовим робочим органом здійснюється завдяки його оберտальному руху, тоді як занурення у масив відбувається внаслідок поступального переміщення разом із навантажувачем. Так, робочий орган розглядається як рухома механічна система, поведінка якої може бути описана за допомогою системи параметричних рівнянь. Рух кожної точки робочого органу моделюється в плоскій (двовимірній) системі координат, що дає змогу математично характеризувати траєкторії переміщення матеріалу та взаємодію компонентів компосту під час процесу змішування і навантаження.

Загальна продуктивність відділення зубами робочого органу частин органічних добрив від бурту і подання їх до гвинтової поверхні гвинтового робочого органу, здійснюючи обертальний рух, переміщує масу до транспортеру, повинна бути більше за продуктивність подання компосту

$$Q_n \leq Q_e. \quad (1)$$

розгорнутому вигляді вираз (1) можна представити рівнянням:

$$A_k v_{n.c.} \leq \frac{z_k \omega B_z}{\pi} \left(\frac{D_p^2 \omega t}{4} - \frac{D_p^2 \sin(2\omega t)}{16} + \frac{v_{n.c.} D_p \cos(\omega t)}{2\omega} \right), \quad (2)$$

де A_k – площа бічної проекції западини катушки, m^2 ;
 $v_{n.c.}$ – поступальна швидкість навантажувача-змішувача, m/c ;
 ω – кутова швидкість обертання робочого органу, $рад/c$;
 z_k – число западин на катушці, шт.;
 B_z – ширина зуба гвинтового робочого органу, m ;
 D_p – діаметр по ріжучих зубах гвинтового робочого органу, m .

Вираз (2) об'єднує між собою діаметр робочого органу по відокремлювальних зубах, поступальну швидкість навантажувача і кутову швидкість робочого органу, а також дають змогу обґрунтувати ці параметри.

Зокрема, рішення цього рівняння щодо поступальної швидкості має вигляд:

$$v_{n.c.} \leq \frac{\frac{1}{4\pi} z_{\kappa} \omega B_3 D_p^2 \left(\omega t - \frac{\sin(2\omega t)}{4} \right)}{A_{\kappa} - \frac{z_{\kappa} B_3 D_p \cos(\omega t)}{2\pi}}. \quad (3)$$

обраними параметрами підбирача-змішувача органо-мінерального компосту (рис. 2) рішення виразу (3) представлено на рис 5.

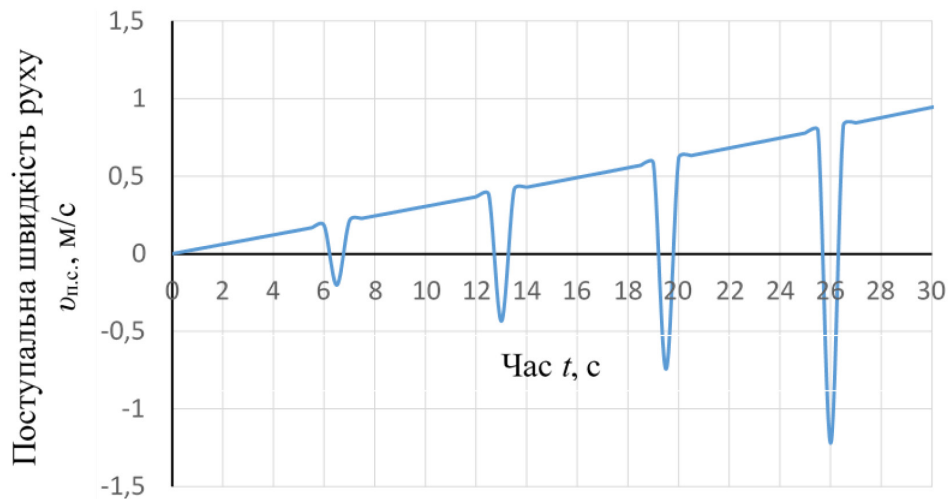


Рис. 5. Залежність поступальної швидкості руху навантажувача-змішувача органо-мінерального компосту в часі

Аналіз рис. 5 свідчить про те, що із часом межа допустимої швидкості руху навантажувача-змішувача органо-мінерального компосту збільшується і за 30 с його роботи вже дорівнює 1 м/с (3,6 км/год). Це пояснюється тим, що із часом продуктивність подачі компосту до транспортеру машини збільшується, що дає змогу збільшувати при цьому її роботу поступальну швидкість руху. Водночас на рис. 5 можна помітити, що швидкість змінюється досить нерівномірно через комбінацію лінійного та синусного членів у чисельнику та косинуса в знаменнику виразу (3). Малі тренди прямої функції швидкості незначні, вони додають тільки «хвилеподібності» на фоні періодичних від'ємних піків. Пояснити це можна тим, що траєкторія руху кожної точки гвинтового робочого органу в процесі обертального руху має вигляд циклоїдальних кривих (рис. 6). За нею швидкість обертання робочого органу вище поступальної швидкості навантажувача-змішувача органо-мінерального компосту.

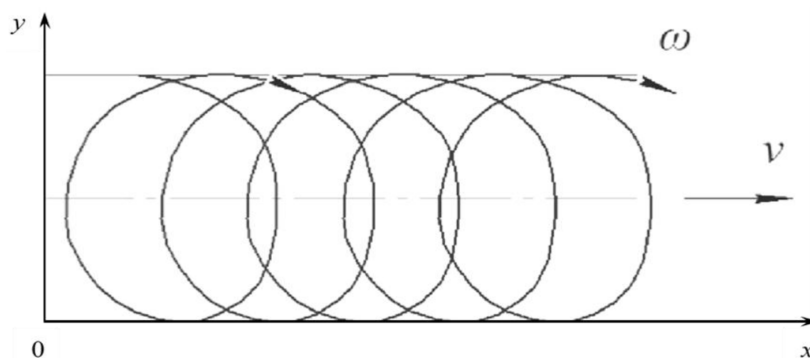


Рис. 6. Траєкторія руху точки робочого органу у вигляді циклоїди



З аналізу вищевикладеного випливає, що робота підбирача-змішувача неможлива без узгодження швидкостей руху машини та робочих органів, оскільки саме це визначає ефективність захоплення, переміщення й змішування біомаси. Тому в подальших дослідженнях потрібне обґрунтування кінематичного коефіцієнту узгодження швидкостей, що репрезентує співвідношення між лінійною швидкістю робочих органів і поступальною швидкістю руху машини. Його фізична природа полягає в забезпеченні збалансованого руху системи «машини – робочий орган – матеріал», коли обертання підбирача й поступальний рух машини взаємно доповнюють одне одного. Якщо швидкість робочих органів менша за швидкість руху агрегата, біомаса не встигає захоплюватися; якщо вони рівні – матеріал лише переміщується без достатнього перемішування; а при надмірному перевищенні швидкості робочих органів біомаса розкидається, зростають втрати й енергоспоживання. Тому кінематичний коефіцієнт є мірою узгодженості рухів, що забезпечує оптимальну траєкторію частинок біомаси, рівномірне змішування та раціональне використання енергії.

Висновки. Розроблена технологічна схема приготування органомінерального компосту з пошаровим укладанням торфу, лігніну та посліду та подальшим перемішуванням дисковою бороною показала ефективне формування однорідної компостної маси. Використання навантажувача-змішувача з дозатором мінеральних добрив забезпечує рівномірне розподілення компонентів, а двосекційний бункер дає змогу одночасно подавати різні види добрив. Аналіз отриманих результатів показав, що кінематичне узгодження швидкостей шнека та дозувального вала забезпечує стабільне перемішування без розсіювання матеріалу, підвищує якість компосту та оптимізує енергоспоживання. Так, запропонована конструкція і технологія дають змогу досягти високої ефективності процесу приготування органомінерального компосту.

Список використаних джерел

1. Писаренко В. М., Писаренко П. В. Органічні добрива на захисті родючості ґрунту : монографія. Полтава, 2022. 156 с.
2. Daum T. Agricultural mechanization and sustainable agrifood system transformation in the Global South. Background paper for The State of Food and Agriculture FAO Agricultural Development Economics Working Paper, 2022. 22–11. <https://doi.org/10.4060/cc2625en>
3. Królczyk Jolanta Beata, Rezwiakow Andrzej, Tukiendorf Marek. Mixing of Biomass and Coal in a Static Mixer as an Example of Technological Solutions Involving Implementation of Renewable Energy Sources. *Ecological Chemistry and Engineering*, 2014. 21(4). 685–696. DOI:10.1515/eces-2014-0050
4. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Головач І. В., Гриник І. В. Малогабаритні сільськогосподарські машини. Конструкція, теорія і розрахунок: монографія. Київ : Аграрна наука, 2017. 292 с.
5. Sayed D. F., Morad M. M., Ali M. M., & El-Maghawry H. A. Study On Some Different Operating Parameters Affecting e Performance Of Compost Turning Machines. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 2021. 48(2). 419–432.
6. Joshua T. Velasco, Gilbert L. Bandisa, Erickson N. Dominguez and Jamesly T. Andres. Design, Fabrication, and Performance Evaluation of a Small-scale Compost-Turning Machine. *Mountain Journal of Science and Interdisciplinary Research*, 2024. 84(1). DOI: 10.70884/mjsir.v84i1.406.
7. Кувачов В. П., Дружич В. М., Шевченко С. О., Зеленов К. О. Дослідження стійкості руху самохідної машини з робочими органами реактивного типу. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2024. 14(2). 15 с. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-3>
8. Кувачов В. П., Дружич В. М., Шевченко С. О., Зеленов К. О. Теоретичні основи руху самохідної машини з робочими органами реактивного типу в системі точного землеробства. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2024. 14(1). 12 с. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-4>

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 12.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





V. Kuvachov, V. Druzhych, S. Shevchenko, K. Zelenov, S. Inuva
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE BIOMASS PICKING AND MIXING PROCESS FOR ORGANIC FERTILIZERS

Summary

The relevance of this study arises from the absence of established mechanical and technological foundations for developing a specialized biomass picker-mixer intended for small farms. The research aims to improve the technical and operational performance of biomass collection and mixing by substantiating the design and technological parameters of a new agricultural unit.

Based on theoretical analysis and experimental justification, a technological scheme for preparing organo-mineral compost has been developed, as well as a structural design of a loader-mixer equipped with a mineral fertilizer dosing system. The proposed design integrates the operations of biomass loading and mineral fertilizer mixing into a single technological process, which significantly increases the efficiency of compost preparation.

The study establishes that the kinematic coordination between the screw conveyor and the dosing shaft ensures uniform distribution of fertilizers throughout the compost mass, contributing to the homogeneity of the mixture and optimizing energy consumption. The technological scheme includes sequential laying of peat, lignin, and manure in alternating layers, followed by active mixing and mineral enrichment. The loader-mixer uses a screw-type feeding mechanism driven by a power take-off shaft, a reduction gearbox, and a dosing bunker. A rigid kinematic connection between the auger and the dosing shaft guarantees synchronized operation and precise dosing during mixing and loading.

Mathematical modeling and analytical relationships were obtained to describe the motion parameters of the working organs, including angular and translational velocities, which determine the intensity of mixing and the rate of material feeding. The results demonstrate that the optimal ratio of screw rotational speed to the machine's forward movement determines the effectiveness of biomass capture, transportation, and mixing. Deviations from this ratio result in uneven blending or excessive energy consumption.

The proposed mechanical design and process scheme allow for the simultaneous execution of loading, mixing, and dosing operations, reducing the total time and energy required for compost preparation. Implementation of such a system in small and medium-sized farms can substantially lower production costs, improve compost quality, and contribute to sustainable agricultural development by recycling organic waste into valuable soil fertilizers.

Keywords: sustainable agricultural development, support for small farmers, technical innovations in the agricultural sector, agroengineering.