

На правах рукописи

Шишкин Игорь Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА ВЕРМИКОМПОСТА ПУТЕМ
РАЗРАБОТКИ И ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
УСТРОЙСТВА ПО ВЫЕМКЕ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова»

Научный руководитель **Макаров Сергей Анатольевич,**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Киров Юрий Александрович,** доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Сельскохозяйственные машины и механизация животноводства»

Запевалов Михаил Вениаминович, доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка и технологии и механизации животноводства»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет»

Защита состоится «19» июня 2026 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.035.03 на базе ФГБОУ «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» и на сайте: <http://www.vavilovsar.ru>

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, пр. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр.3, ученому секретарю диссертационного совета 35.2.035.03, e-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета  **Василий Васильевич Чекмарев**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное тепличное хозяйство Российской Федерации находится в стадии интенсивного развития, что обусловлено как растущим внутренним спросом на свежую овощную продукцию, так и стратегическими задачами обеспечения продовольственной безопасности. По данным ассоциации «Теплицы России», общая площадь промышленных тепличных комплексов в стране на конец 2024 года превысила 4 500 га, а объём производства овощей защищенного грунта составил более 2,1 млн т. При грунтовом способе выращивания, который сохраняется на значительной части тепличных площадей, для поддержания плодородия и биологической активности почвы в теплицах требуется внесение органических удобрений в объёме 10–30 т/га в год. При этом традиционный источник органики – навоз, при внесении без предварительной подготовки имеет риски заноса фитопатогенов, а также семян сорняков. Из известных технологий производства органических удобрений наиболее предпочтительными являются: термофильная анаэробная стабилизация, анаэробное сбраживание, компостирование и вермикомпостирование.

Технология вермикомпостирования обладает рядом преимуществ относительно традиционных методов переработки органических отходов: этот процесс протекает без образования метана, при этом сохраняются питательные вещества в доступной форме и обеспечивается фитосанитарная чистота конечного продукта. Однако в настоящее время внедрение вермикомпостирования в условиях промышленных тепличных хозяйств сдерживается отсутствием необходимых технических средств. Существующие конструкции вермиинкубаторов не адаптированы к требованиям агропромышленного производства, а операция выемки вермикомпоста осуществляется вручную, что требует значительных трудозатрат и приводит к травмированию вермикультуры.

Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что в настоящее время отсутствуют серийно выпускаемые устройства, обеспечивающие механизированную и щадящую выемку вермикомпоста без остановки технологического цикла его производства в вермиинкубаторах. Известные технические решения либо предназначены для бытового использования, либо не обеспечивают необходимой производительности.

Таким образом, совершенствование технологического процесса и технического средства для производства вермикомпоста и извлечения

его из вермиинкубатора представляет актуальную задачу, решение которой будет способствовать повышению эффективности технологии производства вермикомпоста.

Степень разработанности темы. Теоретической основой для проектирования рабочих органов, взаимодействующих с сыпучими и связными органическими материалами, к которым относится вермикомпост, служат фундаментальные работы в области механики грунтов и процессов резания академика В.П. Горячкина, создавшего теоретические основы расчета сельскохозяйственных машин. Значительный вклад в развитие теории резания внесли работы Н.Г. Домбровского, Н.Е. Резника, А.Н. Зеленина, В.В. Азаренко, А.Д. Далина.

Вопросами взаимодействия различных рабочих органов с органическими удобрениями занимались М.Е. Мацепуро, Н.М. Марченко, Н.В. Павлов, П.И. Павлов, Л.В. Гвоздева, А.О. Везиров.

Вместе с тем исследований процессов выемки вермикомпоста из вермиинкубатора недостаточно. Также практически отсутствует обоснование параметров устройств данного назначения, что приводит к снижению производительности и увеличению затрат на производство вермикомпоста.

Цель работы – повышение производительности и обоснование рациональных конструктивно-режимных параметров технического средства для производства вермикомпоста.

Задачи исследования:

1. Проанализировать существующие технологии и технические средства вермикомпостирования, выявить их недостатки и на этой основе разработать перспективную конструктивно-технологическую схему устройства для производства вермикомпоста.

2. Разработать конструкцию установки для производства вермикомпоста, обосновать ее конструктивно-режимные параметры и провести теоретический анализ процесса извлечения готового продукта из вермиинкубатора.

3. Разработать методику экспериментальных исследований и производственных испытаний предлагаемого устройства вермикомпостирования, для определения физико-механических свойств готового вермикомпоста.

4. Провести экспериментальные исследования установки для производства вермикомпоста и определить влияние конструктивно-режимных параметров устройства на процесс извлечения готового продукта.

5. Провести испытания экспериментального устройства для оценки его работоспособности в производственных условиях и определить его экономическую эффективность.

Объект исследования – технологический процесс выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора.

Предмет исследования – закономерности изменения усилия взаимодействия извлекающего устройства (ножа) с материалом в зависимости от конструктивных параметров и режимов работы устройства для выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора.

Научная новизна работы состоит:

- в обосновании новой конструктивно-технологической схемы установки для производства вермикомпоста, оснащенной устройством для выемки готового слоя вермикомпоста;

- в получении аналитических выражений для определения усилий взаимодействия ножа с вермикомпостом, мощности, производительности и энергоемкости устройства для выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора;

- в получении уравнения регрессии, описывающего влияние геометрических параметров ножа на усилие, необходимое для выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора.

- в получении результатов сравнительных производственных испытаний разработанной установки для производства вермикомпоста.

Новизна технических решений установки для производства вермикомпоста, оснащенной устройством для выемки готового слоя, подтверждена патентом Российской Федерации на полезную модель № 208013.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в получении аналитических выражений, используемых для определения необходимых производительности и энергоемкости установки для производства вермикомпоста. Проведен силовой анализ, описывающий процесс выемки вермикомпоста из вермиинкубатора. Обоснованы конструктивные и режимные параметры устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

Результаты экспериментальных исследований применяются в учебном процессе при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий при изучении дисциплин: «Машины и оборудование в животноводстве», «Механизация и автоматизация животноводства», «Технические системы в животноводстве» и др.

Установка для производства вермикомпоста прошла производственные испытания и была внедрена в производство в АО «Совхоз – Весна» Саратовской области. Результаты проведенных исследований рекомендуются для проектно-конструкторских предприятий при разработке и проектировании устройств, обеспечивающих процесс выемки вермикомпоста.

Методология и методы исследования. В качестве методологической базы исследования были задействованы методы системного анализа и математической статистики. Теоретическая часть опиралась на методы математического анализа и принципы классической механики. Экспериментальную работу проводили в строгом соответствии с актуальными государственными стандартами и утверждёнными методическими рекомендациями, включая применение многофакторного планирования экспериментов и разработанных на его основе авторских методик. Анализ и обработку полученных данных осуществляли с использованием современных компьютерных технологий и специализированного программного обеспечения MathCab и Excel.

Научные положения, выносимые на защиту:

- технологический процесс производства вермикомпоста в вермиинкубаторе, оснащённом устройством для извлечения готового слоя органического удобрения;
- аналитические зависимости, позволяющие определить влияние конструктивных и режимных параметров на значения усилия взаимодействия ножа с вермикомпостом, мощности, производительности и энергоёмкости устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора;
- результаты обоснования оптимальных значений конструктивных и режимных параметров устройства для выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечена за счёт достаточного объёма проведённых испытаний, высокой точности измерений и применения стандартного программного обеспечения для статистической

обработки результатов. В исследовании задействованы актуальные методики анализа экспериментальной информации, а все измерительные приборы, использованные в ходе эксперимента, прошли обязательную поверку и соответствовали установленным метрологическим требованиям.

Основные положения научно-квалификационной работы были доложены на конференциях профессорско-преподавательского состава по итогам научно-исследовательской работы за 2022–2025 гг., на Международной научно-технической конференции им. В. В. Михайлова «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники» и Научно-технической конференции с международным участием имени А. Ф. Ульянова «Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса» (Саратов, Вавиловский университет, 2022–2025 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ. Получено 2 патента РФ на полезную модель. Общий объем публикаций составляет 3,4 печ. л., из которых 1,64 печ. л. принадлежит лично соискателю.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 137 страницах компьютерного текста, содержит 11 таблиц, 48 рисунков и 5 приложений. Список литературы включает в себя 120 наименований, из них 12 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, изложены основные научные положения, выносимые на защиту, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В **первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования»** обосновано значение производства вермикомпоста и его применения в сельском хозяйстве.

Проведен анализ технологий и технологических процессов производства вермикомпоста. Рассмотрены субстраты и смеси, используемые для его приготовления. Проанализированы существующие технологические схемы и технические средства, применяемые для производства вермикомпоста. Составлена классификация технических средств. Проведен анализ существующих исследований рабочих органов технических средств, применяемых для производства вермикомпоста.

Анализ выявил недостаточную изученность существующих исследований, направленных на обоснование конструктивно-режимных параметров установки для производства и выемки готового слоя вермикомпоста. Процесс выгрузки готового продукта из вермиинкубатора характеризуется высокой энергоёмкостью и низкой производительностью. Создание механизированного устройства для удаления готового продукта из устройства обеспечит равномерную работу вермиинкубатора, повысит производительность. Таким образом, совершенствование технологии и обоснование конструктивно-режимных параметров устройства для производства вермикомпоста является актуальной задачей.

Во второй главе *«Теоретическое обоснование технологического процесса, выполняемого техническим средством для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора»* на основе выполненного анализа технологий и технических средств производства вермикомпоста, а также теоретических исследований процессов взаимодействия рабочих органов с материалом предлагаются технологический процесс и техническое средство для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

Разработанная технология производства вермикомпоста в вермиинкубаторе включает в себя следующие операции: подготовка субстрата, формирование среды обитания, заселение вермикультуры, процесс вермикомпостирования, выемка вермикомпоста, отделение вермикомпоста от вермикультуры, сушка и упаковка. Основным отличием предлагаемой технологии является наличие процесса отделения вермикомпоста от вермикультуры за счет послышной выемки готового слоя вермикомпоста. Данная технология реализуется в устройстве по производству вермикомпоста (патент РФ на изобретение № 208013), схема которого приведена на рис. 1.

Устройство содержит секцию 1, нижнее основание 2 в виде перфорированной поверхности с равноудалёнными отверстиями. Стенки и нижнее сетчатое основание секции поддерживаются опорами 3. Кроме того, на нижнем основании 2 установлен нож, выполненный сварным из лезвия 4 и направляющих 5. Механизм, приводящий в движение нож, представляет собой мотор-редуктор 6, в который вмонтированы два вала 7 с блоком, натягивающими канат. Скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства 8. На задней стенке секции закреплена ось 9 с блоками. Такая конструкция обеспечивает равномерность процесса извлечения готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора.

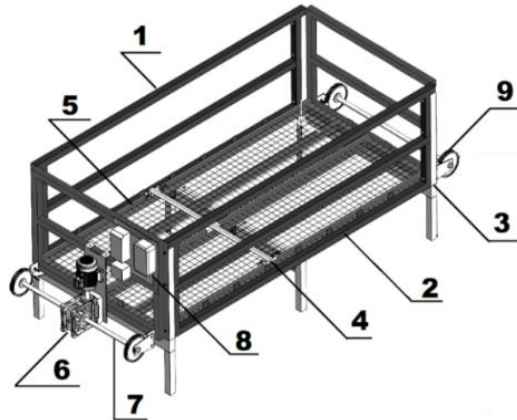


Рисунок 1 – Схема устройства для производства вермикомпоста

Основными параметрами, влияющими на процесс извлечения вермикомпоста, являются (рис. 2): размеры отверстий решётки нижнего основания, мм; скорость движения ножа, м/с; длина ножа, мм; высота ножа, мм; ширина ножа, мм; высота извлекаемого слоя, мм; угол заострения ножа, град.

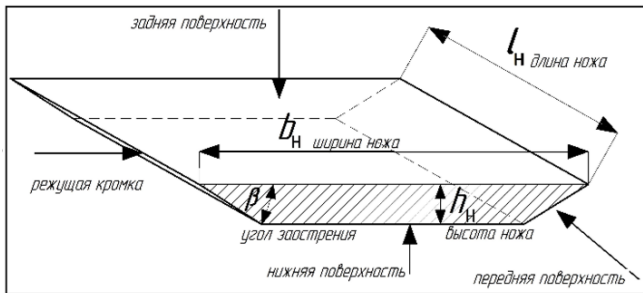


Рисунок 2 – Схема ножа устройства для выемки вермикомпоста

В процессе работы извлекающего устройства происходит отделения готового слоя вермикомпоста (рис. 3) возникают силы: $F_{тр1}$, $F_{тр2}$ – силы трения о верхнюю и нижнюю грани ножа соответственно, Н; G – сила тяжести, Н; $F_{и}$ – сила инерции, Н; $F_{тр3}$ – сила трения о кромку ножа, Н; $F_{дв}$ – движущая сила, Н; N_1 , N_2 , N_3 – соответственно реакции верхней, нижней поверхности и кромки ножа, Н; $F_{рез}$ – сила сопротивления резанию вермикомпоста, Н; v – скорость движения ножа, м/с.

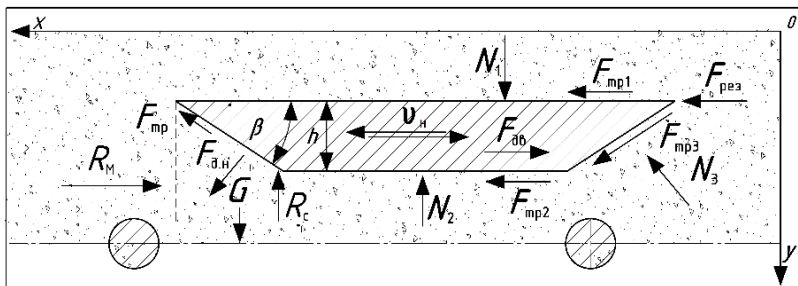


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на нож установки для отделения готового слоя вермикомпоста от массива

Для получения движущей силы составили уравнения сил по осям OX и OY .

Сумма проекций сил, действующих на ось OX :

$$O_x = -F_{рез} - F_{тр1} - F_{тр2} + F_{дв} - F_{тр3} \cos \beta - N_3 \sin \beta. \quad (1)$$

Сумма проекций сил, действующих на ось OY :

$$O_y = -G - N_1 + N_2 - F_{тр3} \sin \beta - N_3 \cos \beta. \quad (2)$$

Из формулы (1) выразили $F_{дв}$ – движущую силу, прикладываемую к ножу и преодолевающую все сопротивления, возникающие в процессе резания. Рассматривая указанное взаимодействие, необходимо учесть геометрические параметры рабочей установки, а также физические свойства материала вермикомпоста:

$$F_{дв} = F_{рез} + F_{тр1} + F_{тр2} + F_{тр3} \cos \beta - N_3 \sin \beta. \quad (3)$$

После подстановки входящих в силы параметров с учетом направления движения ножа для выемки готового слоя вермикомпоста получили следующее выражение:

$$F_{дв} = Sl_n \sigma_p + gf(2(b_n(h_c - h_n)l_n \rho_v) + h_n(b_n - \frac{h_n}{\sin \beta} \cos \beta)l_n \rho_n) + \\ + l_n \frac{E}{2b_n} \left(\frac{h_n}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 (\sin^2 \beta + \mu \cos^2 \beta) (\sin \beta (f^2 + 1)), \quad (4)$$

где S – толщина режущей кромки ножа, м; l_n – длина ножа, м; σ_p – разрушающее контактное напряжение, Па; g – ускорение свободного падения, м/с²; f – коэффициент трения вермикомпоста

по стали, $f = 0,78 \dots 1,14$ при влажности $W = 50\text{--}85\%$; b_n – толщина ножа; h_c – высота слоя вермикомпоста, м; h_n – высота ножа, м; ρ_v – плотность вермикомпоста, при влажности $W = 50\text{--}85\%$, $\rho_v = 485 \dots 860$ кг/м³; β – угол заострения ножа, град.; E – модуль упругости н/м²; μ – коэффициент Пуассона, зависящий от физико-механических свойств вермикомпоста.

Полученное выражение (4) представляет собой силовой анализ взаимодействия рабочих органов с вермикомпостом. Оно связывает усилия взаимодействия с основными параметрами рабочего органа и физико-механическими свойствами вермикомпоста.

Рассмотрев элемент массива вермикомпоста, отсеченный от основной массы лезвием ножа и расположенный между его фронтальной гранью и сетчатым основанием, выявили, что на данный массив будут действовать силы, приведённые на рис. 3: $F_{д.н.}$ – сила давления ножа, Н, в соответствии с третьим законом Ньютона о равенстве действия и противодействия $F_{д.н.} = N_3$, где N_3 – реакция массы вермикомпоста, действующая на кромку ножа, рассмотренная нами ранее: R_m – сила давления массы вермикомпоста на отсеченную часть, Н; R_c – реакция, действующая на массив со стороны основания, Н; $F_{тр}$ – сила трения массы вермикомпоста о поверхность ножа, Н.

При проведении дальнейших исследований рабочего процесса отделения готового слоя вермикомпоста от массива рассмотрели упрощенную модель массы вермикомпоста, расположенную на сетчатом основании, в виде совокупности квадратных пластин со стороны размером a и высотой пласта h_n , которые шарнирно опираются всеми четырьмя кромками на поверхность решета. Действие верхней части всей массы вермикомпоста на нижний слой, контактирующий с решетом, заменяли равномерно распределенной нагрузкой с постоянной интенсивностью.

Было установлено, что в качестве внутренних разрушающих усилий в пластине будут возникать изгибающие моменты M_x и M_y , которые достигают максимального значения в центре пластины, и перерезывающие усилия Q_x и Q_y , достигающие максимума посередине сторон контура пластины. При выполнении неравенства (6) часть вермикомпоста, отделенная ножом от основного массива, не будет перемещаться в горизонтальном направлении, а только в вертикальном (проходить через отверстия в нижнем основании), что способствует повышению производительности рабочего процесса устройства.

$$F_{д.н.} \leq \frac{\Delta h_b l_h h_n \rho_b g \frac{\mu}{1-\mu}}{\sin \beta + f \cos \beta}. \quad (6)$$

Общую мощность P , затрачиваемую на выполнение процесса выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора, представили следующим образом:

$$P = \sum P_o + P_{дв}, \quad (7)$$

где P_o – мощность на перемещение ножа при отсутствии нагрузки, Вт;
 $P_{дв}$ – мощность на перемещение ножа в слое материала, Вт:

$$P_{дв} = \left\{ \left[S l_h \sigma_p + g f \left(2(b_h (h_c - h_n) l_{h\rho_b}) + h_n \left(b_h - \frac{h_n}{\sin \beta} \cos \beta \right) l_{h\rho_h} \right) \right] + \right. \\ \left. + l_h \frac{E}{2b_h} \left(\frac{h_n}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 (\sin^2 \beta + \mu \cos^2 \beta) (\sin \beta (f^2 + 1)) \right\} v / \quad (8)$$

Производительность выемки вермикомпоста из вермиинкубатора Q определялась по формуле:

$$Q = \frac{h_n}{\sin \beta} l_{h\rho_b} v. \quad (9)$$

Энергоёмкость процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора \mathcal{E}_c :

$$\mathcal{E}_c = \left\{ \left[S l_h \sigma_p + g f \left(2(b_h (h_c - h_n) l_{h\rho_b}) + h_n \left(b_h - \frac{h_n}{\sin \beta} \cos \beta \right) l_{h\rho_h} \right) \right] + \right. \\ \left. + l_h \frac{E}{2b_h} \left(\frac{h_n}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 (\sin^2 \beta + \mu \cos^2 \beta) (\sin \beta (f^2 + 1)) \right\} v / \\ / \frac{h_n}{\sin \beta} l_{h\rho_b} v. \quad (10)$$

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлены программа и методика исследований, направленных на обоснование конструктивных и режимных параметров устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора. Проверку теоретических положений и обоснование рациональных параметров устройства проводили на экспериментальной установке (рис. 4), оснащённой регулируемым приводом ножа и тензодатчиком SBA-100L для регистрации тягового усилия.



Рисунок 4 – Общий вид установки для производства вермикомпоста

При изучении физико-механических свойств вермикомпоста, таких, как влажность, плотность, угол внутреннего трения, коэффициент трения покоя по стали и сопротивление резанию, использовали известные методы. Исследования параметров установки включали в себя одно-, двух- и трёхфакторные эксперименты. Определяли оптимальные размеры решет в зависимости от просыпаемости вермикомпоста через отверстия. Изучали влияние скорости движения ножа и толщины срезаемого слоя на усилие и производительность. Определяли влияние на усилие геометрических параметров ножа (высоты, ширины и угла заострения) по методу Бокса – Бенкена.

Эксперименты проводили при влажности вермикомпоста 70 % в строгой последовательности: подготовка установки и материала, выполнение рабочего процесса с регистрацией параметров, взвешивание продукта и обработка данных. Перед испытаниями проводили тарировку измерительного оборудования.

Производственные испытания опытного образца установки проводили на базе АО «Совхоз – Весна» Саратовской области. В результате получено более 5 т органического удобрения. Полученный вермикомпост удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 56004-2014. В процессе испытаний сравнивали существующую технологию с предлагаемой, определяли время извлечения готового вермикомпоста, объём получаемого материала и общую производительность.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» приведены результаты экспериментальных исследований, которые включали в себе ряд экспериментов, направленных на анализ влияния параметров устройства для производства вермикомпоста. Определены средние величины основных физико-механических параметров вермикомпоста: плотность $\rho = 710 \text{ кг/м}^3$; липкость $\sigma_{\text{л}} = 6,75 \text{ Н/м}^2$; угол трения $\varphi = 51 \text{ град.}$; коэффициент трения движения по стали $f_{\text{д}} = 1,1$; трения скольжения $f_{\text{с}} = 1,2$; внутреннего трения $f_{\text{в}} = 1,2$.

Полученные физико-механические параметры вермикомпоста определяют характер его просыпания через решётку и напрямую влияют на выбор оптимальных геометрических параметров отверстий нижнего основания. В результате экспериментов установлено, что минимальная масса просыпавшегося вермикомпоста достигается при размерах отверстий $50 \times 50 \text{ мм}$.

Размеры отверстий нижнего основания существенно влияют на работу установки, поскольку определяют условия просыпания вермикомпоста и, как следствие, энергоэффективность и производительность процесса выемки.

Анализ зависимостей, полученных в ходе реализации двухфакторного эксперимента, позволил определить рациональные значения исследуемых параметров. Оптимальные параметры процесса выемки вермикомпоста, обеспечивающие минимальную энергоёмкость $\mathcal{E}_{\text{с}} = 33 \text{ Дж/кг}$: скорость $V = 0,3 \text{ м/с}$, толщина слоя вермикомпоста $h_{\text{в}} = 15 \text{ мм}$.

Для определения влияния геометрических параметров ножа – высоты (X_1) ширины (X_2), и угла его заострения (X_3) – на значения движущей силы (Y) был составлен план эксперимента, основные уровни варьирования выделенных факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Факторы, уровни факторов и интервалы их варьирования

Фактор	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Уровни фактора		
			основной 0	верхний +1	нижний -1
h_n – высота ножа, м	X_1	0,005	0,01	0,015	0,005
b_n – ширина ножа, м	X_2	0,02	0,09	0,11	0,07
β – угол заострения ножа, град.	X_3	10°	35°	45°	25°

После обработки результатов экспериментов было получено уравнение регрессии:

$$y = 158 + 14,5x_1 + 27,875x_2 - 10,375x_3 + 8,25x_1x_2 - 8,25x_1x_3 - 12,5x_2x_3 + 6,75x_1^2 + 13x_2^2 + 17,5x_3^2. \quad (11)$$

Дифференциальный анализ уравнений регрессии позволил определить оптимальные значения факторов: высоты h_n (X_1), ширины b_n (X_2) и угла заострения ножа β (X_3), влияющих на движущую силу $F_{дв}$ (Y). Так, минимальное усилие, возникающее при работе установки, $F_{дв} = 141$ Н получается при высоте ножа $h_n = 7$ мм, ширине ножа $b_n = 70$ мм и угле его заострения $\beta = 33$ град.

Поверхности отклика (рис. 5, 6, 7) наглядно демонстрируют зависимость движущей силы от комбинации высоты ножа, его ширины и угла заострения.

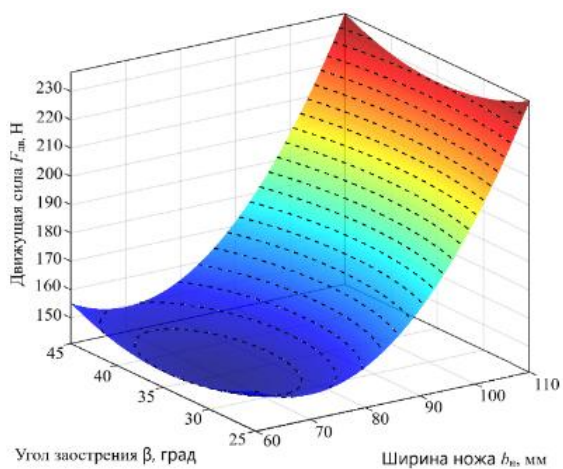


Рисунок 5 – Поверхность отклика, характеризующая показатель $F_{дв}$ в зависимости от ширины ножа b_n (X_2) и угла заострения β (X_3) при высоте ножа $h_n = 7$ мм

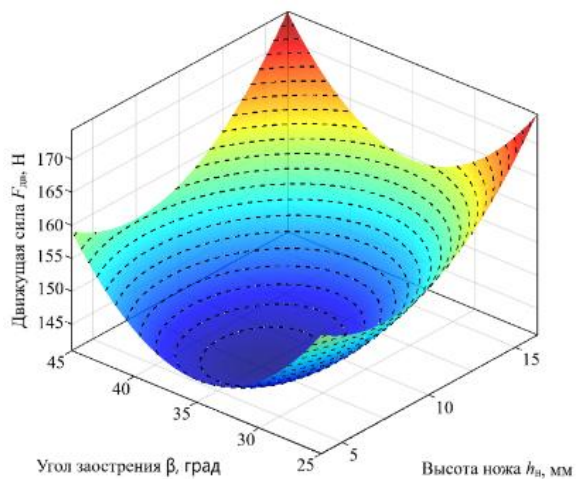


Рисунок 6 – Поверхность отклика, характеризующая показатель $F_{дв}$ в зависимости от высоты ножа h_n (X_1) и угла заострения β (X_3) при ширине ножа $b_n = 70$ мм

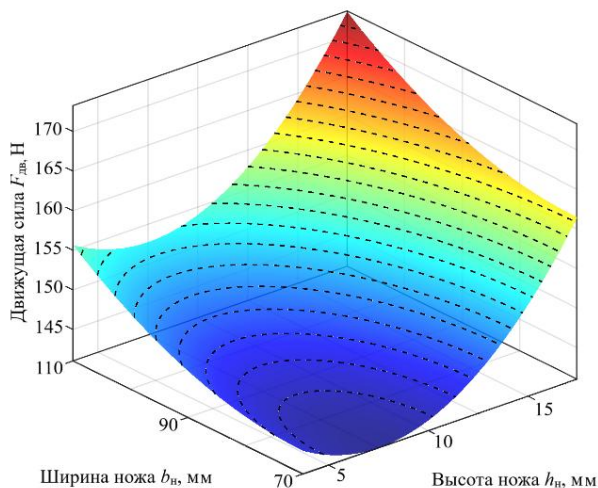


Рисунок 7 – Поверхность отклика, характеризующая показатель $F_{дв}$ в зависимости от высоты ножа h_n (X_1) и его ширины b_n (X_2) при угле заострения ножа $\beta = 33$ град.

Производственные испытания опытного образца установки проводились на базе АО «Совхоз – Весна» Саратовской области. Было переработано 5 т субстрата. Продолжительность извлечения вермикомпоста при существующей технологии составила 27 мин, а предлагаемая установка позволила сократить время, затрачиваемое на извлечение, до 7,8 мин, что привело к повышению производительности процесса извлечения вермикомпоста в 3,45 раза.

В дальнейшем была проведена оценка сходимости теоретических и экспериментальных зависимостей влияния высоты ножа на производительность выемки вермикомпоста и движущую силу, необходимую для осуществления процесса выемки вермикомпоста (рис. 8, 9). Расхождения не превышают 5 %, что подтверждает адекватность предложенных моделей.

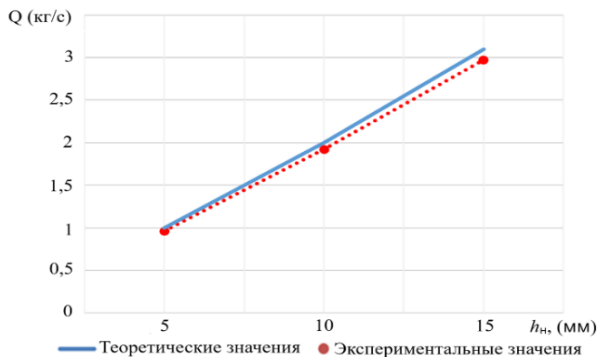


Рисунок 8 – Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований производительности Q (кг/с) в зависимости высоты ножа h_n (мм)

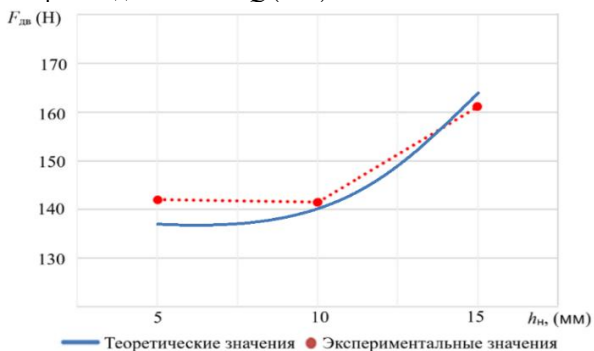


Рисунок 9 – Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований движущей силы $F_{дв}$ (Н) в зависимости высоты ножа h_n (мм)

В пятой главе «Технико-экономическая эффективность» представлен расчет экономической эффективности предлагаемого устройства, который был выполнен после проведения производственных испытаний. Результаты отражены в табл. 2.

Таблица 2 – Экономическая эффективность предлагаемой технологии

Параметр	Существующая технология	Предлагаемая технология
Балансовая стоимость, руб.	296000	348000
Производительность, т/ч	3,04	11,16
Годовой объем работ, т	130	130
Количество персонала, чел.	4	2
Снижение трудоемкости, %	–	86,2

Расчетный экономический эффект предлагаемой технологии при годовом объёме переработки 130 тонн субстрата составит 41 275 руб.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составит 1,26 года. С учетом того, что, например, в Саратовской области 125 гектаров теплиц и их потребность в органическом удобрении составляет 3750 тонн в год, расчётный экономический эффект составит 1190625 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научно-техническая задача повышение производительности и обоснование рациональных конструктивно-режимных параметров технического средства для производства вермикомпоста путем разработки конструкции механизированного устройства и исследования его работы.

Полученные теоретические и экспериментальные зависимости для усилия взаимодействия, мощности привода, производительности и энергоёмкости. Они позволили обосновать рациональные параметры и режимы работы: скорость перемещения устройства, высоту отделяемого слоя, геометрические параметры рабочего органа. Использование предлагаемого устройства в производстве вермикомпоста обеспечивает повышение эффективности технологического процесса производства органических отходов в высококачественное удобрение.

1. На основании анализа литературных источников и существующих технологических решений установлено отсутствие специализированных технических средств для механизированной выемки вермикомпоста из вермиинкубатора. Существующие методы основаны на ручном труде или адаптации универсальных машин, что обуславливает высокую трудоемкость и низкую производительность процесса.

2. Разработана конструктивно-технологическая схема устройства для производства вермикомпоста с механизированным способом выемки готового слоя (патент РФ на полезную модель № 208013), включающая в себя секцию, сетчатое нижнее основание и нож, выполненный сварным методом из лезвия и направляющих. Предложенная схема исключает ручной труд при выемке продукта, обеспечивая равномерный процесс отделения вермикомпоста от субстрата.

3. Получены аналитические выражения, связывающие усилия взаимодействия с основными параметрами рабочего органа и физико-механическими свойствами вермикомпоста: выражение (4) для движущей силы, формула (8) для мощности привода, выражение (9) для производительности, формула (10) для энергоёмкости. Установлено, что основное влияние на процесс оказывают: скорость перемещения ножа, высота отделяемого слоя, ширина и длина рабочего органа, угол заострения ножа и физико-механические свойства материала.

4. В результате экспериментальных исследований установлены зависимости движущей силы, мощности привода, производительности и энергоёмкости от конструктивно-режимных параметров. Максимальная производительность 3,1 кг/с достигается при высоте слоя $h = 15$ мм и скорости $v = 0,3$ м/с. Рациональная энергоёмкость $\Theta_e = 33,5$ Дж/кг обеспечивается при скорости $v = 0,3$ м/с, высоте слоя $h = 15$ мм, высоте ножа 7 мм, его ширине 70 мм и угле заострения 33 град. Оптимальные размеры отверстий решетчатого основания составляет 50×50 мм, что минимизирует просыпание материала в процессе вермикомпостирования.

5. Внедрение разработанного устройства в АО «Совхоз – Весна» Саратовской области позволило получить расчетный экономический эффект 41,275 тыс. руб. за год в ценах на январь 2026 г. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составил 1,26 года, что подтверждает экономическую целесообразность предложенного технического решения. С учетом того, что, например, в Саратовской области 125 гектаров теплиц и их потребность в органическом удобрении составляет 3750 тонн в год, расчётный экономический эффект составит 1 190 625 руб.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Разработанное устройство для выемки готового слоя вермикомпоста целесообразно рекомендовать к применению на предприятиях, занимающихся переработкой органических отходов животного и растительного происхождения с использованием вермикультуры. Для обеспечения устойчивого технологического процесса и высокого качества готового удобрения при эксплуатации оборудования необходимо соблюдать установленные сроки переработки субстрата, поддерживать микроклиматические параметры (температуру, влажность, аэрацию) и соблюдать конструктивные параметры устройства в пределах значений, подтверждённых экспериментальными исследованиями.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Перспективным направлением является совершенствование рабочего органа устройства за счёт применения альтернативных материалов, обеспечивающих более эффективное отделение слоя вермикомпоста от массива. В дальнейших исследованиях рекомендуется совершенствование производства вермикомпоста путем разработки комплексов технических средств, обеспечивающих автоматизацию наиболее трудоемких процессов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Определение условия прохождения массы вермикомпоста через решетчатую поверхность / С. А. Макаров, А. М. Марадудин, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин** // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 4. – С. 105–110.
2. Определение движущей силы при работе трапециевидного ножа в слое вермикомпоста / **И. В. Шишкин** // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 6. – С. 134–138.

Патенты

3. Патент на полезную модель № 208013 U1 Российская Федерация, МПК C05F 3/06. Устройство для производства биогумуса / С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин**, Р. А. Денисов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова». – № 2021119289; заявл. 01.07.2021; опубл. 29.11.2021.
4. Патент на полезную модель № 212304 U1 Российская Федерация, МПК C05F 3/06, C05F 3/00. Устройство для производства биогумуса / И. Р. Азизов, **И. В. Шишкин** [и др.]; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова». – № 2022107691; заявл. 22.03.2022; опубл. 15.07.2022.

Публикации в других изданиях

5. Выбор вермикультуры при производстве перспективного удобрения «биогумус» / С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин**, А. С. Березкин // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. Национальной науч.-техн. конф. с международным участием им. В. В. Михайлова. Саратов, 15–16 мая 2020 г. Вып. 33. – Саратов: Амирит, 2020. – С. 185–189. – EDN MZAAZP.

6. Обзор способа вермикомпостирования при производстве перспективного удобрения «биогумус» / С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин**, А. С. Березкин // Актуальные проблемы и перспективы инновационной агроэкономики : сб. статей Национальной (Всероссийской) науч.-практ. конф. Саратов, 25 декабря 2020 г. – Саратов, 2020. – С. 213–216. – EDN NMNWHM.

7. Устройство и принцип работы автоматизированного комплекса по производству вермикомпоста / С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин** [и др.] // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – No. 28. – P. 103–111. – DOI 10.26160/2474-5901-2022-28-103-111. – EDN YUQDVN.

8. Анализ существующих технических средств и способов производства вермикомпоста / Е. Е. Демин, С. А. Макаров, **И. В. Шишкин** [и др.] // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: матер. XXXV Междунар. науч.-техн. конф. им. В. В. Михайлова. Саратов, 18–19 мая 2022 г. Вып. 35. – Саратов: Амирит, 2022. – С. 255–265. – EDN GOESDG.

9. Исследование взаимодействия рабочего органа устройства с вермикомпостом / Е. Е. Демин, С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин** // Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки: матер. Региональной науч.-техн. конф., посвящ. 110-летию Вавиловского университета. Саратов, 13–17 февраля 2023 г. Вып. 1. – Саратов: Амирит, 2023. – С. 16–19. – EDN MCUWYD.

10. Перспективы развития производства органических удобрений в России / С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин**, К. М. Катин // Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса: матер. науч.-техн. конф. с международным участием им. А. Ф. Ульянова. Саратов, 03 октября 2023 г. – Саратов, 2023. – С. 90–93. – EDN XILMJG.

11. Конструкция механизированного устройства по производству вермикомпоста / С. А. Макаров, Е. Е. Демин, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин** // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: матер. XXXVI Междунар. науч.-техн. конф. им. В. В. Михайлова. Саратов, 17–18 мая 2023 года. – Саратов, 2023. – С. 345–350. – EDN AWPNSR.

12. Вермикомпостирование как перспективный способ утилизации отходов птицеводства / С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин**, А. С. Березкин // Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса: науч.-техн. конф. с междунар. участием им. А. Ф. Ульянова. Саратов, 17 октября 2024 г. – Саратов, 2024. – С. 58–61. – EDN IWRPZW.

13. Предпосылки развития сельского хозяйства на базе гранулированных органических удобрений / С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин** [и др.] // Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса: науч.-техн. конф. с международным участием им. А. Ф. Ульянова. Саратов, 17 октября 2024 г. – Саратов, 2024. – С. 55–57. – EDN FOCJFK.

14. Prospects for the Development of Organic Fertilizer Production in Russia / S. A. Makarov, A. V. Danilin, **I. V. Shishkin**, K. M. Katin // Наука и образование в XXI веке : современные векторы развития и перспективы : национальная науч.-техн. конф. Саратов, 29 февраля 2024 г. – Саратов, 2024. – С. 214–216. – EDN CUHNPX.

15. Виды вермикомпоста, применяемые в тепличных хозяйствах / С. А. Макаров, А. В. Данилин, **И. В. Шишкин** [и др.] // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. XXXVII Междунар. науч.-техн. конф. им. В. В. Михайлова. Саратов, 15–16 мая 2024 г. – Саратов, 2024. – С. 212–215. – EDN KKWHEV.

Подписано в печать
Печ. л. 1,0

Формат 60×84 1/16
Тираж 100
