

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии  
и инженерии имени Н. И. Вавилова»**

*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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Макаров Сергей Анатольевич

Саратов 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	10
1.1. Анализ технологий и технологических процессов производства вермикомпоста .....	10
1.2. Субстраты и смеси, используемые для производства вермикомпоста .....	12
1.3. Существующие технологические схемы производства вермикомпоста .....	15
1.4. Анализ существующих технических средств, применяемых для производства вермикомпоста .....	29
1.5. Классификация технических средств, применяемых для производства вермикомпоста .....	34
1.6. Анализ существующих исследований рабочих органов технических средств, применяемых для производства вермикомпоста .....	38
1.7. Цели и задачи .....	45
1.8. Выводы по главе .....	45
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, ВЫПОЛНЯЕМОГО ТЕХНИЧЕСКИМ СРЕДСТВОМ ДЛЯ ВЫЕМКИ ВЕРМИКОМПОСТА ИЗ ВЕРМИИНКУБАТОРА .....	47
2.1. Разработка технологического процесса и технического средства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора .....	47
2.2. Предлагаемая технологическая схема производства органического удобрения .....	48
2.3. Теоретическое обоснование прохождения вермикомпоста через сито .....	51
2.4. Силовой анализ процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора .....	60
2.5. Мощность устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора .....	64
2.6. Производительность устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора .....	65

2.7. Энергоемкость устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора .....	65
2.8. Выводы по главе .....	66
<b>ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>68</b>
3.1. Методика исследования физико-механических свойств вермикомпоста .....	69
3.2. Описание экспериментальной установки .....	72
3.3. Программа и методика экспериментальных исследований установки для производства вермикомпоста .....	75
3.4. Последовательность проведения опытов .....	86
3.5. Выводы по главе .....	89
<b>ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>90</b>
4.1. Результаты исследований физико-механических свойств вермикомпоста .....	91
4.2. Результаты исследования процесса просыпания вермикомпоста .....	92
4.3. Результаты экспериментальных исследований режимных параметров рабочего процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора .....	94
4.3.1. Влияние скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя на движущую силу .....	94
4.3.2. Влияние на мощность привода скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя вермикомпоста .....	96
4.3.3. Влияние скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя на производительность устройства для выемки вермикомпоста .....	97
4.3.4. Влияние скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя на энергоемкость процесса выемки вермикомпоста .....	98
4.4. Результаты исследований влияния геометрических параметров рабочего органа на усилие выемки вермикомпоста из установки по его производству .....	101
4.5. Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований .....	111

4.6. Выводы по главе .....	113
ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ .....	115
5.1. Производственные испытания установки для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора .....	115
5.2. Расчет технико-экономической эффективности .....	117
5.3. Выводы по главе .....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	121
РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ .....	123
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ .....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	124
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	138

## ВВЕДЕНИЕ

**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 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 автоматизированную 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 энергоемкости 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.

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.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Анализ технологий и технологических процессов производства вермикомпоста

Органические отходы, образующиеся в результате сельскохозяйственной деятельности, могут быть переработаны в органические удобрения, широко применяемые в растениеводстве. Существуют различные методы переработки органических отходов, среди которых наиболее перспективным является вермикомпостирование.

Вермикомпостирование представляет собой процесс переработки твердых органических отходов и субстратов на их основе с использованием вермикультуры (от латинского *vermis* – червь), для которой органические вещества являются источником питания и среды обитания [73]. В результате данного процесса образуется органическое удобрение – вермикомпост [94]. Он содержит большое количество полезных микроэлементов, способствующих росту растений, улучшает структуру почвы, ее аэрационные и влагоудерживающие свойства, что особенно важно для тяжелых глинистых и истощенных почв, увеличивает содержание гумуса – основного органического вещества почвы, необходимого для питания и развития растений [120].

Вермикомпостирование представляет собой экологически безопасный способ переработки органических отходов, оно значительно ускоряет разложение органики и позволяет сократить потребности в применении химических удобрений, которые могут иметь негативные побочные эффекты, такие, как загрязнение почвы и водоемов нитратами и фосфатами [74, 112, 117].

Для получения органического удобрения с высоким содержанием гумусных веществ осуществляют вермикомпостирование отходов животноводства, которое включает в себя ряд технологических операций (рисунок 1.1) [75, 119].

Первая операция вермикомпостирования – подготовка субстрата, включающая в себя обработку и смешивание отходов растениеводства и животноводства. Субстрат должен соответствовать следующим параметрам [95]:

- влажность – 70–75 %;
- кислотно-щелочной баланс (рН) – 6,5–7,5;

- соотношение углерода к азоту (C:N) – 20:1;
- содержание минеральных веществ – до 10 %;
- содержание сырого протеина – не более 25 %.

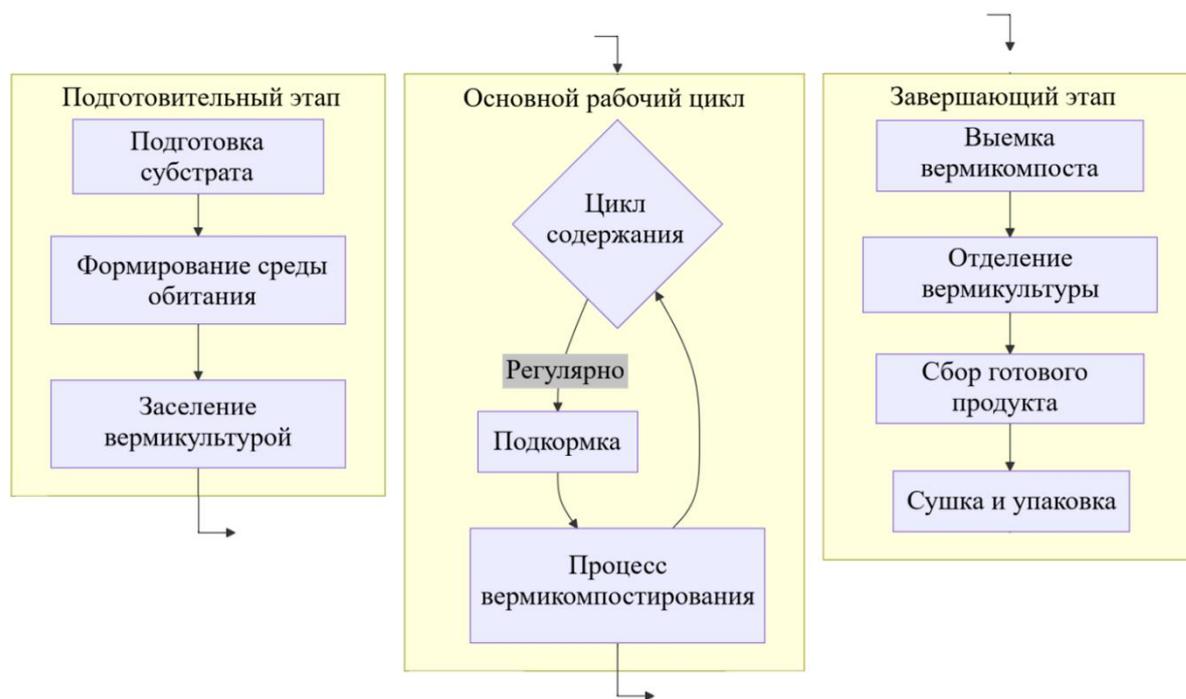


Рисунок 1.1 – Карта технологических операций производства вермикомпоста

Субстрат также должен быть измельчен в соответствии с ГОСТ Р 56004-2014 и не содержать включений размером более 10 мм [76].

После подготовки субстрата формируется среда обитания для вермикультуры, которая может различаться в зависимости от используемых методов и технических средств. В условиях устойчивого режима работы вермикультуры среда обитания расслаивается на три зоны [77]:

1. Верхняя зона (5–10 см) – зона кормления, содержащая свежий субстрат, который служит кормом для вермикультуры. Количество субстрата в этой зоне постоянно меняется, так как он перерабатывается и переносится на средний слой, периодически возобновляясь в процессе подкормки.

2. Средняя зона (10–20 см) – рабочая зона, где отмечается повышенная температура за счет жизнедеятельности вермикультуры.

3. Нижняя зона (ниже 20–25 см) – зона накопления готового вермикомпоста, которая постоянно увеличивается в процессе вермикомпостирования.

После формирования слоя субстрата в вермиинкубаторе происходит процесс заселения его вермикультурой. Ее вносят вместе с субстратом, в котором она транспортировалась, для более быстрой адаптации.

Первую подкормку осуществляют через 2 дня после заселения вермикультуры, затем каждые 3–5 дней. Масса подкормки зависит от массы вермикультуры, заселенной в вермиинкубатор. Известно, что вермикультура ежедневно перерабатывает субстрат, равный половине ее массы [78, 118].

Процесс переработки субстрата вермикультурой в ходе ее жизнедеятельности называется вермикомпостированием. Для его успешного протекания необходимо соблюдать следующие условия:

- температура субстрата – 18...25 °С; при перегреве (>35 °С) вермикультура гибнет, при охлаждении (<10 °С) впадает в спячку;
- влажность – 75–80 %;
- кислотность (рН) – 6,5–7,5.

Процесс выемки вермикомпоста из вермиинкубатора является наиболее сложным и трудоемким. Он может осуществляться двумя методами:

- с удалением всего объема субстрата;
- с удалением только готового слоя.

При удалении всего объема вермикомпоста из вермиинкубатора необходима дополнительная операция – отделение вермикультуры от вермикомпоста, осуществляемая с помощью специальных машин, обеспечивающих просеивание вермикомпоста.

Полученный готовый вермикомпост подвергают сушке и упаковке для сохранения его полезных свойств.

## **1.2. Субстраты и смеси, используемые для производства вермикомпоста**

В процессе вермикомпостирования в качестве основы субстрата может использоваться широкий спектр органических материалов [115,116]. К ним относятся различные виды навоза (как с подстилкой, так и в виде твёрдой фракции

без неё), птичий помёт, торф и солома. Хорошо подходят также опилки лиственных деревьев, макулатура, включая неокрашенный картон и бумагу, опавшие листья и растительные остатки, такие, как ботва, очистки, переспелые фрукты и овощи [2]. Кроме того, в процессе производства органического удобрения могут быть использованы побочные продукты агропромышленного производства: отходы мясопереработки и рыбной промышленности, пивоваренный жом, а также использованный субстрат после выращивания грибов [1, 2, 3].

Формирование субстрата является ключевым этапом в процессе вермикультивирования [113]. Важно учитывать, что субстрат выполняет двойную функцию. Во-первых, он служит средой обитания, в которой осуществляются все жизненные процессы вермикультуры, а во-вторых он является источником питательных веществ, необходимых для жизнедеятельности вермикультуры [79].

Дыхание вермикультуры осуществляется через кожу, поэтому она относится к аэробным организмам и нуждается в постоянном доступе кислорода. Субстрат необходимо готовить рыхлым, предварительно измельчённым и увлажнять в процессе вермикомпостирования. Такие характеристики обеспечивают хорошую воздухопроницаемость и создают благоприятную среду для жизнедеятельности компостных червей. При формировании питательной смеси критически важно поддерживать сбалансированное содержание ключевых макроэлементов: азота – 1,8–2,0 %, фосфора – приблизительно 3,0 %, калия – около 2,5 %. Необходимо контролировать соотношение углерода к азоту (C:N) в органической основе субстрата, оно должно находиться в оптимальном интервале от 15 до 20 ед. [96, 4, 5].

Особое внимание уделяется предварительной подготовке органических отходов перед внесением субстрата в вермиинкубатор. На этом этапе сырьё подвергается выдержке, что позволяет стабилизировать его химический состав и избежать таких негативных последствий, как резкое повышение температуры или выделение токсичных газов, способных привести к гибели вермикультуры.

Каждый компонент субстрата требует обязательной предварительной подготовки: его необходимо измельчить, равномерно увлажнить и подвергнуть ферментации или частичному гниению. Такая обработка обеспечивает переход

органики в биологически доступную форму, создаёт комфортные условия для активной жизнедеятельности и способствует эффективному воспроизводству вермикультуры [6].

Навоз крупного рогатого скота отличается повышенной щелочностью, из-за чего его необходимо выдерживать 6–8 месяцев на открытых площадках. Для улучшения структуры и баланса питательных веществ в такую смесь рекомендуется добавлять 20–25 % измельченных целлюлозосодержащих компонентов: соломы или опилок. Если навоз КРС получен на откормочных площадках, где животным скармливают корма с высоким содержанием белка, уровень протеина в отходах возрастает. В этом случае объем целлюлозных добавок увеличивают, а срок повышают до года [6, 7, 80].[2]

Овечий навоз, несмотря на высокую питательную ценность и благоприятное воздействие на вермикультуру, нуждается в обязательной предварительной обработке. Это связано с его изначальной высокой щелочностью и чрезмерной плотностью, так как в овчарнях он сильно утрамбовывается под весом животных. Для подготовки навоз извлекают пластами, тщательно увлажняют и разрыхляют, после чего формируют в бурты или помещают в навозохранилища, где он проходит естественную ферментацию в течение 6–8 месяцев. Такая выдержка позволяет снизить pH, улучшить структуру и сделать субстрат пригодным для дальнейшей переработки [6, 7, 111].

Свиной навоз широко используется в вермикомпостировании, но требует особого подхода из-за повышенной кислотности и значительного содержания белковых соединений. Для нейтрализации этих показателей в субстрат добавляют 30–40 % мелкоизмельченных целлюлозосодержащих компонентов, таких, как солома, опилки или макулатура. Кроме того, срок ферментации увеличивают до года с обязательным регулярным контролем уровня pH, чтобы создать оптимальные условия для вермикомпостирования. [2]

Примечательно, что свиной навоз, полученный методом гидросмыва из свинарников, обладает иной физико-химической структурой и может быть использован в качестве питательной основы для вермикультуры даже без

предварительного компостирования при условии соблюдения необходимых санитарных и технологических норм [6, 7, 81].

Кроличий навоз имеет щелочную реакцию и может быть использован без добавления целлюлозосодержащих компонентов. Тем не менее для снижения агрессивности среды его рекомендуется ферментировать в течение 5–7 месяцев. Куриный помет, напротив, отличается высокой кислотностью, поэтому при его использовании в субстрат вносят значительное количество целлюлозных материалов – до 50 % от общего объема смеси [6, 7, 8].

Согласно результатам проведённых исследований, при использовании растительных отходов в сбалансированных соотношениях с навозом достигается высокий выход готового вермикомпоста – до 72 %. Это обусловлено оптимальным сочетанием органических компонентов, обеспечивающим благоприятные условия для жизнедеятельности компостных червей и интенсивность переработки субстрата [9, 114].

### **1.3. Существующие технологические схемы производства вермикомпоста**

Методы производства вермикомпоста зависят от климатических условий и объемов производства. В регионах с мягкими климатическими условиями вермикультуры, необходимые для процесса вермикультивирования, содержатся на открытых площадках. Для его организации задействуют малопригодные или не используемые для традиционного земледелия участки. В регионах с суровым климатом применяется гибкая двухформатная модель производства: в летний период процессы ведутся на открытых площадках, а в холодное время года – в закрытых адаптированных помещениях [10]. К последним относятся теплицы, овощехранилища, а также реконструированные здания бывших ферм, что позволяет поддерживать стабильную температуру, необходимую для жизнедеятельности вермикультуры, и обеспечивать круглогодичный цикл производства органического удобрения [82].

Способ производства в ящиках (рисунок 1.2) получил наибольшее распространение в регионах с суровым климатом, где другие методы

малоэффективны. Процесс осуществляется в ящиках объемом 30–80 л и высотой около 20 см. В стенках и дне предусмотрены отверстия для вентиляции и отвода избыточной влаги. Ящики устанавливают штабелями по 3–5 ед., при этом верхние оснащают перфорированным дном, а нижний — сплошным. Для снижения испарения субстрат накрывают пленкой [10, 83, 84]. Данный метод характерен для мелкомасштабного производства, тепличных хозяйств и дачных кооперативов, ориентированных на собственные нужды. Однако он требует значительных трудозатрат: субстрат укладывают послойно, а при возникновении неблагоприятных условий, например, в начале ферментации или использовании некачественного сырья вермикультура не имеет возможности мигрировать в безопасную зону, что может привести к гибели.

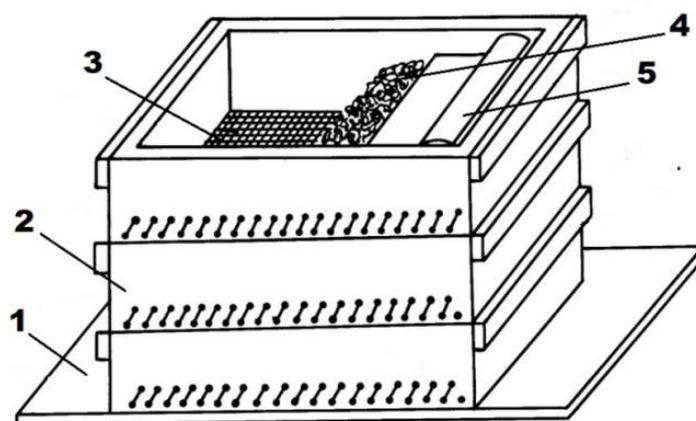


Рисунок 1.2 – Способ вермикультивирования в ящиках:  
1 – поддон; 2 – ящик; 3 – сетчатое дно; 4 – субстрат; 5 – пленка

В закрытых помещениях широко применяют вермиинкубаторы (рисунок 1.3). Многоярусные конструкции и сами инкубаторы изготавливают из металла, что делает метод материалоемким и дорогостоящим [84]. Все операции от загрузки субстрата до сбора готового продукта выполняют вручную. Такой подход используется в основном в мелкотоварном секторе, а на крупно товарных в основном для разведения вермикультуры [85].

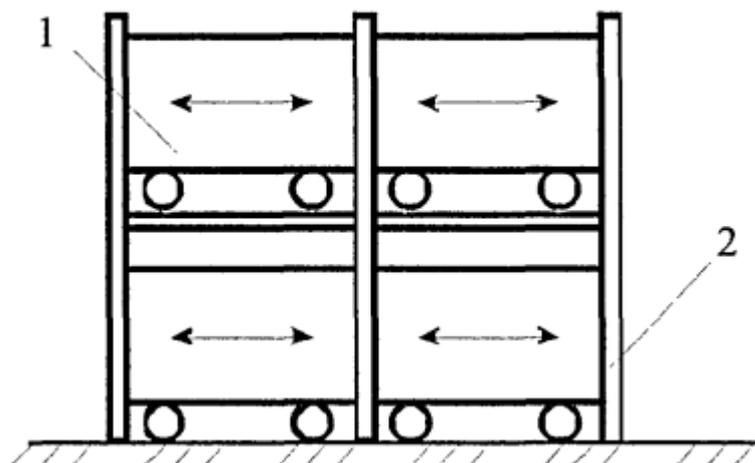


Рисунок 1.3 – Способ производства вермикомпоста в ярусных вермиинкубаторах:  
1 – вермиинкубатор; 2 – ярус

В помещениях с контролируемым микроклиматом широко применяется стеллажный метод производства вермикомпоста [97]. Существует несколько его вариантов. В одной из распространённых модификаций (рисунок 1.4) многоярусные металлические конструкции. В ней на установленные листы из металла, служащие основанием размещают субстрата, который вермикультура перерабатывает в вермикомпост.

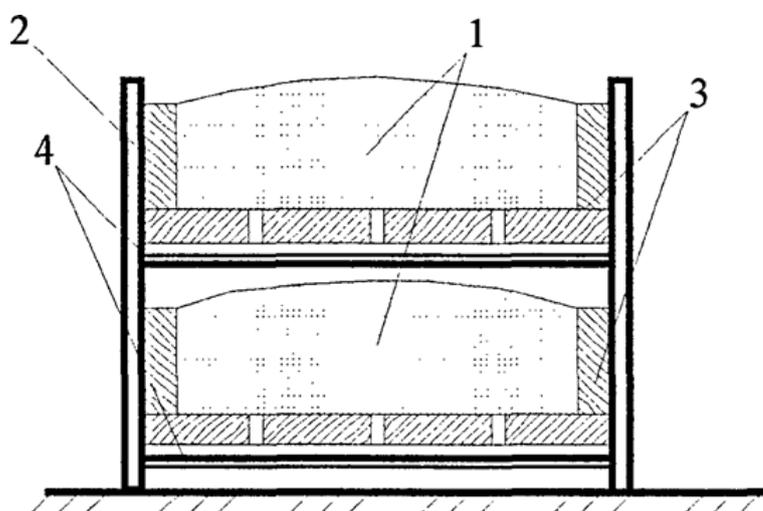


Рисунок 1.4 – Стеллажный способ производства вермикомпоста:  
1 – вермикомпост; 2 – металлический каркас; 3 – стеллаж; 4 – поддон

Существует схожий способ производства вермикомпоста. При данном способе вермикультивирования из субстрат формируют в параллельные гряды, а по мере его использования осуществляют послойное распределение подкормки. Несмотря на эффективность, данный метод производства вермикомпоста требует

значительных трудозатрат на загрузку субстрата и выгрузку вермикомпоста из-за многоярусного строения стеллажей, которые усложняют операции загрузки субстрата, выгрузки вермикомпоста, подкормки и выманки вермикультуры. Этот способ производства вермикомпоста является металлоемким из-за использования металлических каркасов и решеток. Он может быть применен для получения малых объемов вермикомпоста в мелкотоварном производстве [7].

Довольно редко в качестве стеллажей используют ленточные транспортеры (рисунок 1.5). Они позволяют автоматизировать начальные технологические операции вермикультивирования: распределение субстрата и выгрузку готового продукта. Однако, остальные трудозатратные операции осуществляют вручную.

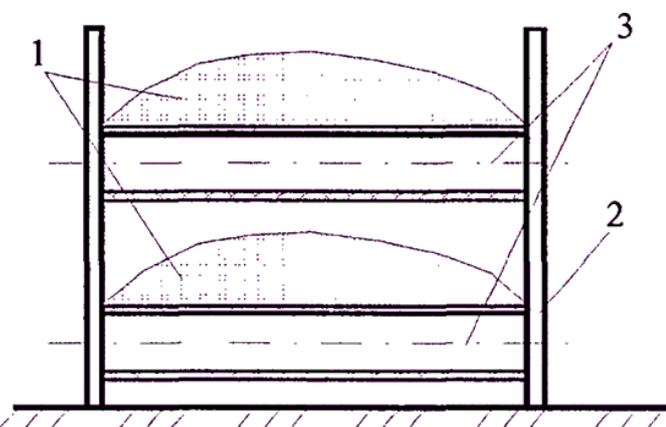


Рисунок 1.5 – Стеллажный способ производства вермикомпоста:  
1 – вермикомпост; 2 – металлический каркас; 3 – ленточный транспортер

Применение транспортерных лент и металлоконструкций повышает стоимость оборудования и делает метод экономически целесообразным лишь для мелкосерийного производства. Он не решает задачи масштабного улучшения плодородия почв.

Существует также грядный способ вермикультивирования (рисунок 1.6), который применяется в районах с умеренными или мягкими климатическими условиями и осуществляется на открытых площадках [98]. Гряды формируют высотой 20 см, шириной 2,5 м и длиной до 20 м. В процессе вермикомпостирования гряды увеличиваются в высоту и могут достигать полуметра. Их размещают на пологих склонах с учетом дренажа и стока воды, желательно предусмотреть укрытия от сильных ветров. По мере производства вермикомпоста на гряды добавляют свежую

подкормку слоем 10–15 см [11]. Для поддержания активности вермикультуры проводят регулярную операцию по насыщению воздухом субстрата. Это способствует удалению аммиака, сероводорода и метана, а также насыщению кислородом. Насыщение воздухом необходимо проводить с осторожностью, так как в верхнем слое (5–10 см) сосредоточено максимальное количество особей, и механическое воздействие может привести к их повреждению и снижению воспроизводства. На стандартной делянке за год перерабатывается до 1200 кг субстрата с получением 0,6–0,7 т биологически безопасного вермикомпоста [9]. В холодный период гряды укрывают соломой, сеном, мешковиной, камышовыми матами или полиэтиленовой пленкой. Недостатком метода является неравномерное распределение влажности по высоте гряды: в нижней части она выше, что способствует ухудшению процесса вермикомпостирования.

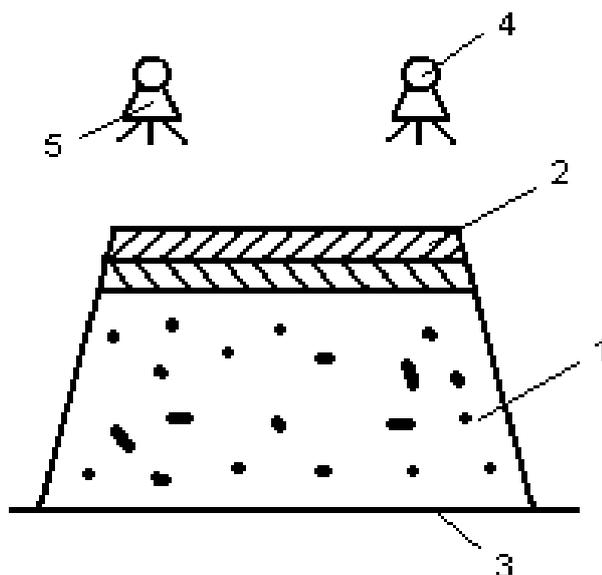


Рисунок 1.6 – Гряда с послойным распределением подкормки:

1 – вермикомпост 2 – субстрат; 3 – лоток; 4 – трубопровод; 5 – форсунки

Для регионов с умеренным климатом А. А. Соколов разработал метод вермикультивирования в деревянных траншеях (рисунок 1.7). Согласно этой технологии, на открытой площадке или в закрытом помещении выкапывают траншею шириной 1,3 м, длиной 0,6 м и глубиной около 30 см. На дно укладывают 10-сантиметровый слой песка, поверх которого монтируют доски с зазорами 3–5 см. Это обеспечивает эффективный отвод избыточной влаги и достаточную

аэрацию субстрата. Для того, чтобы предотвратить обрушение стенок, их либо обшивают досками, либо укрепляют бетоном. Между внутренними стенками траншеи и самой грядой оставляют небольшой зазор для улучшения вентиляции.

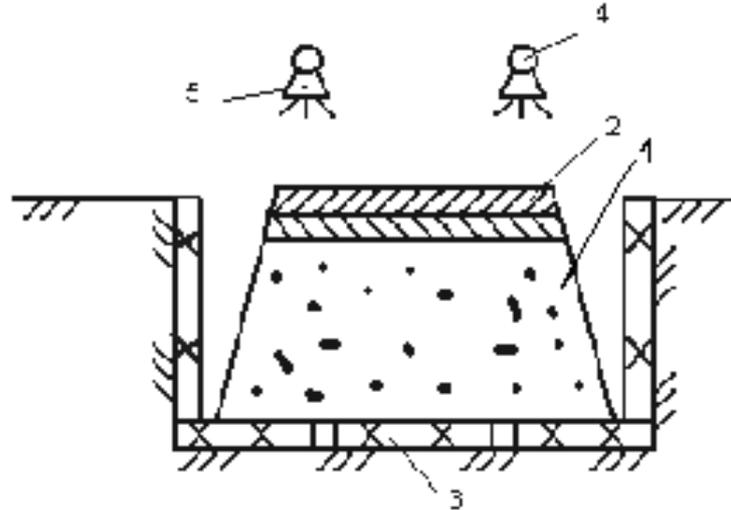


Рисунок 1.7 – Вермикультивирование в траншеях, облицованных досками:  
1 – вермикомпост; 2 – подкормка; 3 – доски; 4 – трубопровод; 5 – форсунки

Часто при грядном производстве вермикомпоста над грядой монтируют систему капельного или распылительного полива: по трубопроводу с форсунками подаётся вода для поддержания оптимальной влажности субстрата на уровне 70–75 %. После укладки 20-сантиметрового слоя компоста и заселения червей подкормку вносят регулярно каждые 2–3 недели, добавляя свежий субстрат слоем 10–15 см. В зимний период гряду укрывают полиэтиленовой плёнкой, чтобы защитить вермикультуру от промерзания и сохранить благоприятные условия для её жизнедеятельности.

Аналогичным образом могут применяться траншеи габаритными размерами 2,5×1,3×0,6 м, облицованные деревянными досками. В зимний период укрытие таких траншей пленкой обеспечивает слабое естественное прогревание, что препятствует промерзанию органической массы и способствует поддержанию активности вермикультуры. Однако данный подход имеет существенный недостаток: в случае возникновения неблагоприятных условий (например, при начале интенсивной ферментации или использовании некачественного субстрата)

черви не имеют возможности переместиться в безопасную зону, что может привести к их гибели [1, 99].

Производство вермикомпоста в бетонных лотках (рисунок 1.8) реализуется в помещениях с регулируемым микроклиматом, что позволяет повысить интенсивность вермикультивирования. В лоток глубиной до 0,4 м, шириной 2,5 м и длиной до 70 м загружают подготовленный субстрат слоем не более 20 см и заселяют вермикультуру. Важной особенностью данной технологии является наличие зазора шириной 10–15 см между стенками лотка и грядой, который служит укрытием для червей при возникновении нежелательных ферментационных процессов в субстрате [12].

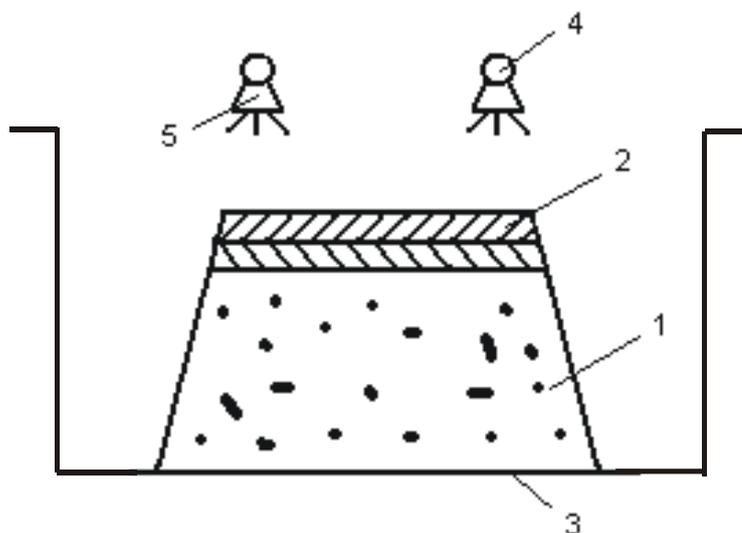


Рисунок 1.8 – Производство вермикомпоста в бетонных лотках:

1 – вермикомпост; 2 – субстрат; 3 – лоток; 4 – трубопровод; 5 – форсунки

Вместе с тем конструкция используемых лотков не предусматривает дренажной системы, что приводит к застою влаги и её чрезмерному накоплению в нижних слоях компостной гряды. Избыточная влажность нарушает естественный газообмен, снижает уровень кислорода в субстрате и способствует развитию анаэробных процессов. Это ухудшает микроклимат в среде обитания популяции, может вызывать закисление субстрата и снижение биологической активности вермикультуры. Неблагоприятные условия замедляют процесс переработки органики и уменьшают выход вермикомпоста [49].

Способ производства вермикомпоста грядным методом с боковым распределением подкормки (рисунок 1.9) реализуется следующим образом [100]. На подготовленной площадке формируют гряду высотой и шириной примерно 50 см, при этом её длина ограничена исключительно размерами производственного помещения или доступной площадью. В процессе переработки субстрата вермикультурой свежую подкормку последовательно укладывают сбоку от уже сформированной основной гряды. По мере перемещения зоны активной переработки систему увлажнения также перемещают и устанавливают непосредственно над новым слоем подкормки, обеспечивая равномерное поддержание влажности на уровне 70–75 %.

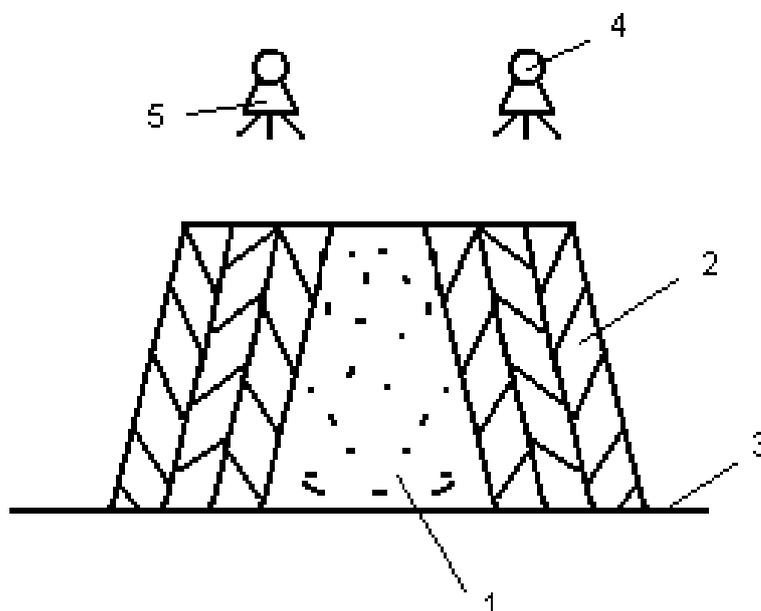


Рисунок 1.9 – Гряда с боковым распределением подкормки:  
1 – субстрат; 2 – подкормка; 3 – лоток; 4 – трубопровод; 5 – форсунки

Одним из ключевых преимуществ грядного метода является возможность частичной или даже полной механизации всех этапов технологического цикла: от приготовления и измельчения исходного сырья до формирования гряд, внесения подкормки и последующего сбора готового вермикомпоста. Это значительно повышает производительность и снижает трудозатраты, особенно на крупных предприятиях.

В зимний период субстрат с вермикультурой дополнительно утепляют, накрывая слоем соломы, сена, мешковины, камышовых матов или полиэтиленовой плёнки. Такая защита в сочетании с незначительным естественным прогревом гряды под воздействием солнечного света в дневные часы эффективно предотвращает

промерзание субстрата и позволяет поддерживать жизнедеятельность червей даже при пониженных температурах окружающей среды.

Механизированные технологии вермикультивирования направлены на повышение производительности и получение вермикомпоста в промышленных масштабах. Однако вопросам разработки и внедрения эффективных технических средств для автоматизации процессов уделяется недостаточно внимания. Вследствие этого широкомасштабное распространение вермикультивирования сдерживается отсутствием специализированного оборудования. На сегодняшний день около 70–80 % всех технологических операций по производству вермикомпоста выполняется вручную [13].

Бункерный метод вермикультивирования с послойной закладкой субстрата реализуется в специализированных стационарных установках – биореакторах (рисунок 1.10). Такая технология обеспечивает точный контроль микроклимата: поддержание стабильной температуры, регулярную аэрацию и равномерное увлажнение, что создаёт оптимальные условия для жизнедеятельности вермикультуры и эффективной переработки органики.

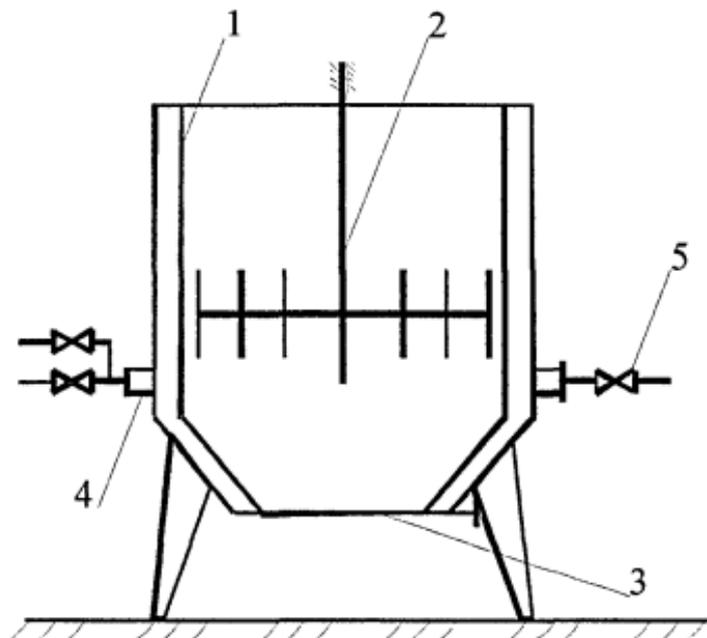


Рисунок 1.10 – Биореактор: 1 – емкость с терморубашкой; 2 – вал с перемешивающим рабочим органом; 3 – шиберная заслонка; 4 – патрубок для подачи воды; 5 – клапан

Процесс начинается с загрузки в реактор двух слоёв: сначала вносят 5–10 см зрелого компоста, заселённого вермикультурой, а поверх него свежий органический субстрат, предназначенный для переработки.

Затем каждые 2–3 дня перерабатываемую массу механически рыхлят с помощью встроенного рабочего органа, предотвращая уплотнение и способствуя равномерному распределению кислорода. Ежедневно в систему подаётся дозированный объём воздуха, а также осуществляется гидратация субстрата для поддержания влажности на уровне 70–75 %, наиболее благоприятной для протекания процесса вермикомпостирования.

В течение месяца при строгом соблюдении условий микроклимата вермикультура полностью перерабатывает субстрат. По завершении цикла готовый продукт выгружают и разделяют на две части: одну сохраняют как «маточную» культуру с компостом для запуска следующего производственного цикла, а вторую направляют на постобработку. На этом этапе осуществляют отделение популяции от готового удобрения, после чего оба компонента проходят финальную подготовку и поступают в реализацию [9].

Использование биореакторов в технологии производства вермикомпоста значительно повышает металлоёмкость процесса, поскольку для организации промышленного выпуска требуется одновременное задействование целого парка таких установок. В частности, для обеспечения непрерывного цикла необходимо наличие большого количества специализированного оборудования и механизмов, предназначенных как для загрузки субстрата, так и для выгрузки переработанной массы вместе с вермикультурой.

В отличие от бункерного способа, при курганном методе вермикультивирования переработка органического сырья осуществляется с применением специального устройства (рисунок 1.11) [14]. Этот подход позволяет снизить зависимость от сложных стационарных конструкций и частично заменить их мобильными или упрощёнными техническими решениями, адаптированными под условия открытых площадок или полузакрытых помещений.

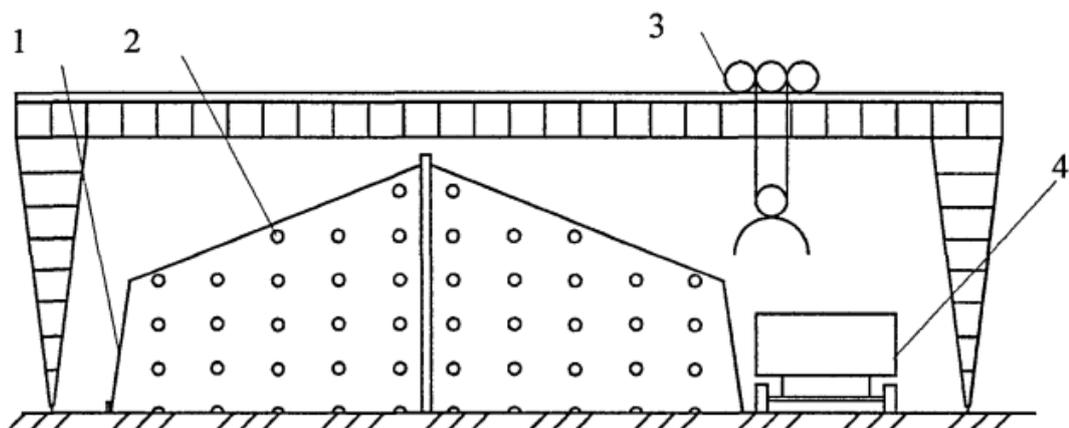


Рисунок 1.11 – Устройство для переработки органического субстрата в вермикомпост:  
 1 – формообразующая стенка; 2 – перфорированные трубы; 3 – подъёмный механизм;  
 4 – транспортное средство

Технологический процесс вермикомпостирования курганным способом (патент РФ № 2049082) реализуется следующим образом [15].

С помощью подъемного механизма на основание будущего кургана укладывают перфорированные трубы, после чего поверх них послойно размещают органический субстрат с одновременным внесением вермикультуры. Формирование компостного кургана в рамках данной технологии осуществляется с использованием съёмных формообразующих стенок, что обеспечивает заданную геометрию массива. Закладку перфорированных труб и загрузку органического субстрата производят с привлечением подъёмно-транспортного оборудования, что повышает степень механизации процесса.

Перфорированные трубы устанавливают в систему подачи воздуха с избыточным давлением. Они выполняют ключевую функцию регулирования микроклимата внутри компостной массы: обеспечивают принудительную аэрацию и способствуют интенсивному удалению углекислого газа, создавая тем самым благоприятные условия для жизнедеятельности вермикультуры.

Вместе с тем технология отличается высокой металлоёмкостью, обусловленной необходимостью использования значительного количества металлических конструкций от формообразующих элементов до трубопроводных систем. Это, в свою очередь, влечёт за собой существенные капитальные затраты на создание и запуск производственной линии. Эффективная эксплуатация

подобной установки возможна только при наличии квалифицированного персонала, способного управлять сложными техническими процессами.

Кроме того, последовательная укладка слоёв субстрата и прокладка перфорированных труб значительно увеличивают продолжительность производственного цикла и усложняют выполнение базовых операций вермикультивирования, снижая общую технологическую эффективность метода.

Организовать вермикультивирование (т. е. получение вермикюльтуры с целью производства вермикомпоста) можно несколькими способами, как в домашних, так и в промышленных условиях.

Технология производства вермикомпоста включает в себя следующие этапы: подготовка субстрата, заселение вермикюльтуры, ее кормление и уход, прореживание (так как культура быстро размножается и лишнюю массу необходимо переселять на новые объемы), сбор вермикомпоста.

Весь цикл подготовки субстрата к состоянию, пригодному для питания вермикюльтуры, называется ферментацией [102]. В процессе ферментации температура в органической массе должна быть снижена с 55...60 °С до температуры окружающей среды (20...25 °С), доступность элементов питания, содержащихся в исходном материале, необходимо повысить. Технологический процесс первоначальных стадий ферментации компостов в летних условиях заканчивается через 2–3 недели.

Подготовленный субстрат необходимо закладывать в специальные лотки для обеспечения жизнедеятельности вермикюльтуры. При создании мест обитания вермикюльтуры необходимо учитывать требования к условиям внешней среды: оптимальный температурный режим +19...+25 °С; влажность 70–80 %; кислотность среды обитания рН – 6,8–7,2. Места обитания должны быть расположены вдоль по направлению главенствующих ветров. Это связано с тем, что вермикюльтура боится ветра и уходит с подветренной стороны. Навозный субстрат необходимо размещать слоем 15–20 см. Перед заселением вермикюльтуры субстрат необходимо проверить на кислотность. При щелочной реакции

рекомендуется вносить верховой торф или производить полив водой, подкисленной соляной кислотой [16, 103].

Заселение вермикультурой выполняют совместно с внесением питательного субстрата, в котором она находилась ранее. Вермикультуру распределяют по поверхности или выкладывают в углубление в центре ящика. Маточную семью в 1500 особей размещают на 1–2 м<sup>2</sup> субстрата.

В начальный период вермикультуру не кормят. Спустя 1–2 месяца начинают добавлять субстрат (подкормку) тонким слоем. Вермикультура непрерывно потребляет субстрат. От постоянного наличия корма зависят ее продуктивность и численность. Однако новую партию питательной смеси добавляют только после того, как переработана предыдущая. Следующую питательную смесь размягчают, укладывается слоем 3–5 см, при этом оставляют зазоры для доступа воздуха. Если вермикультура отказывается от переработки субстрата, вероятно, брожение продуктов не завершилось. Такой субстрат убирают и ждут, когда смесь будет готова для питания вермикультуры. Перенасыщение субстрата вермикультурой приводит к измельчанию поголовья и снижению темпов роста вермикультуры. Для этого ее необходимо прореживать. Перед началом отделения вермикультуры от вермикомпоста необходимо убедиться в готовности субстрата. После переработки вермикультурой готовый субстрат представляет собой однородную рыхлую сыпучую массу темного цвета с едва ощутимым земельным запахом. Отделить биомассу от вермикомпоста можно вручную, либо отсеять цилиндрическим ситом. Такая выборка вермикультуры является трудоемкой и довольно длительной операцией. Возможно применение выемки методом выманки кормом. Вермикультуру на одну или две недели перестают подкармливать. Затем сверху укладывают слой субстрата, и голодная вермикультура за 2–3 дня полностью перемещается в него. Слой с вермикультурой снимают и переносят в другую емкость. Выманка кормом также осуществляется с помощью сетчатого ящика. Когда вермикультура переработает субстрат, сверху устанавливают ящик со свежим кормом, и вермикультура сквозь сетку постепенно перемещается в него. Для быстрого отделения вермикультуры от вермикомпоста субстрат распределяют

в освещенном месте. Каждые 10 мин верхний слой 2–3 см снимают, пока на самом низу не останется вермикультура. Для более эффективного отделения вермикультуры операцию целесообразно проводить несколько раз. При производстве вермикомпоста оптимальная температура субстрата составляет 15...25 °С. С целью удаления вермикультуры субстрат внизу подогревают. В результате теплового воздействия вермикультура перемещается в верхние слои вермикомпоста.

При разведении вермикультуры в промышленных масштабах необходимо применять технические средства для отделения вермикультуры от вермикомпоста. На больших фермах для просеивания вермикомпоста используют вибросита и сепараторы. Отделение происходит быстро, но при этом травмируется большая часть вермикультуры.

Сепаратор для отделения вермикультуры состоит из корпуса, барабана, механизма привода, приемного и выводящего устройства. Конструкции могут иметь некоторые особенности. В некоторых из них установлены одна или несколько сеток с ячейками разного размера, а также один или несколько желобов для вывода просеянного вермикомпоста. Барабан устанавливают с небольшим уклоном, чтобы масса по мере вращения самостоятельно продвигалась к выходу [16, 104].

Вибрационный сепаратор, состоящий из грохота и вибросита, используют для отсеивания вермикультуры и калибровки вермикомпоста. Сито в нем может быть одно или несколько. Их устанавливают в несколько ярусов, каждое с небольшим уклоном в сторону желоба. Отделенную вермикультуру и коконы разделяют на несколько вермикомпостеров. Излишки направляют на корм птице, скоту или на продажу. Сбор вермикомпоста осуществляется после отделения вермикультуры из вермикомпоста ручным или механизированным способом.

Исходя из вышеизложенного, нами предложена технологическая схема производства вермикомпоста, которая включает в себя следующие основные технологические операции (рисунок 1.12).

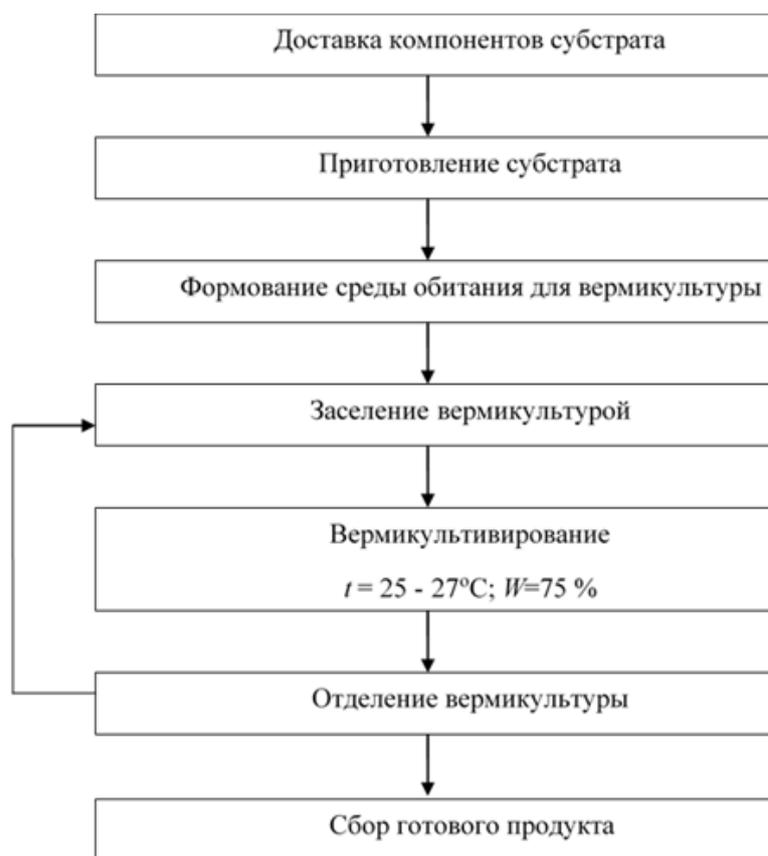


Рисунок 1.12 – Технологическая схема производства вермикомпоста

#### 1.4. Анализ существующих технических средств, применяемых для производства вермикомпоста

Для выявления перспективных направлений совершенствования технологий и технических средств для производства вермикомпоста необходимо провести объективный и полный анализ существующих технологий и средств механизации данного производства.

Известно мобильное средство (рисунок 1.13) для получения вермикомпоста, защищенное патентом на полезную модель № 155933 (подобные патенты на полезную модель – № 194518, № 185289, № 171474) [17, 18, 19, 20]. Оно относится к устройствам для получения экологически чистого удобрения вермикомпоста на основе переработки органических отходов растительного и животного происхождения с помощью вермикультуры. Мобильное устройство для получения вермикомпоста состоит из секций, поддонов и боковых стенок с отверстиями для аэрации на уровне среднего поддона. Поддоны установлены вертикально относительно друг друга. Верхний поддон имеет крышку в виде жесткой кровли с

ручкой для открывания и дно, выдвигающееся с помощью рукоятки в бок. В боковых стенках среднего поддона выполнены равноудаленные отверстия и продернут смесительный шнур. Нижнее основание представляет собой перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями. Нижний поддон размещен на основании, выдвигающемся с помощью рукоятки. Поддоны и боковые стенки выполнены из темного металлопластика и образуют модуль из трех частей. В нижней части задней стенки на уровне нижнего поддона находятся колеса.

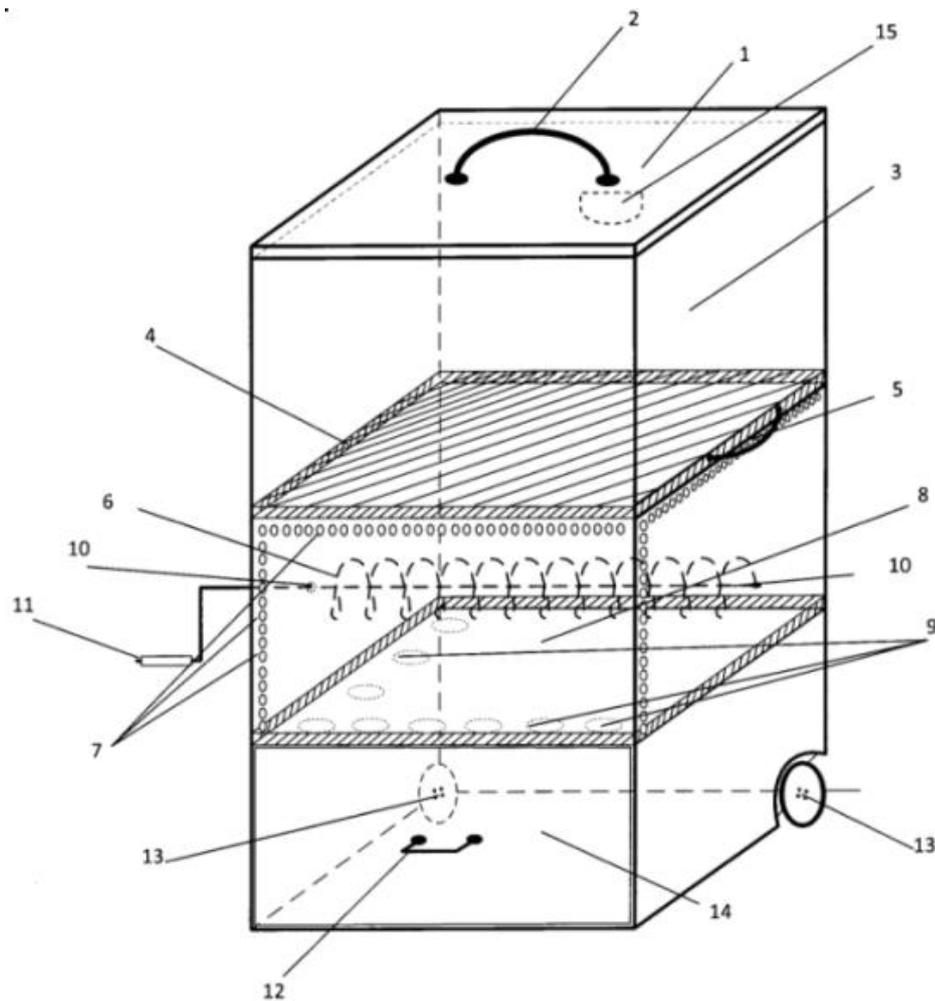


Рисунок 1.13 – Мобильное устройство для получения вермикомпоста:

- 1 – крышка в виде жесткой кровли; 2 – ручка для открывания крышки;
- 3 – верхний поддон устройства (органические отходы); 4 – дно верхнего поддона;
- 5 – рукоятка для выдвигания дна верхнего поддона; 6 – смесительный шнур;
- 7 – перфорированные стенки среднего поддона; 8 – средний поддон устройства (переработка органических отходов); 9 – перфорированная поверхность нижнего основания среднего поддона с равноудаленными отверстиями; 10 – отверстия для смесительного шнура; 11 – рукоятка смесительного шнура; 12 – рукоятка для выдвигания нижнего поддона; 13 – колеса; 14 – нижний поддон устройства (готовый продукт); 15 – рукоятка для перемещения устройства

Основными недостатками данного устройства являются отсутствие средств механизации для выполнения технологических операций при производстве вермикомпоста, а также малый объем перерабатываемого субстрата и производимого вермикомпоста [20].

Другое техническое средство (рисунок 1.14), защищенное патентом на изобретение № 2264372 (подобные патенты на изобретение – № 112189, № 2144015), предназначено для очистки осадка бытовых и близких к нему по составу промышленных сточных вод и переработки его в компост с помощью вермикультуры. Оно может быть использовано в коммунальном хозяйстве вахтовых поселков, сел, баз отдыха, в индивидуальном жилье на территории, не имеющей центральной канализации [21, 22, 23].

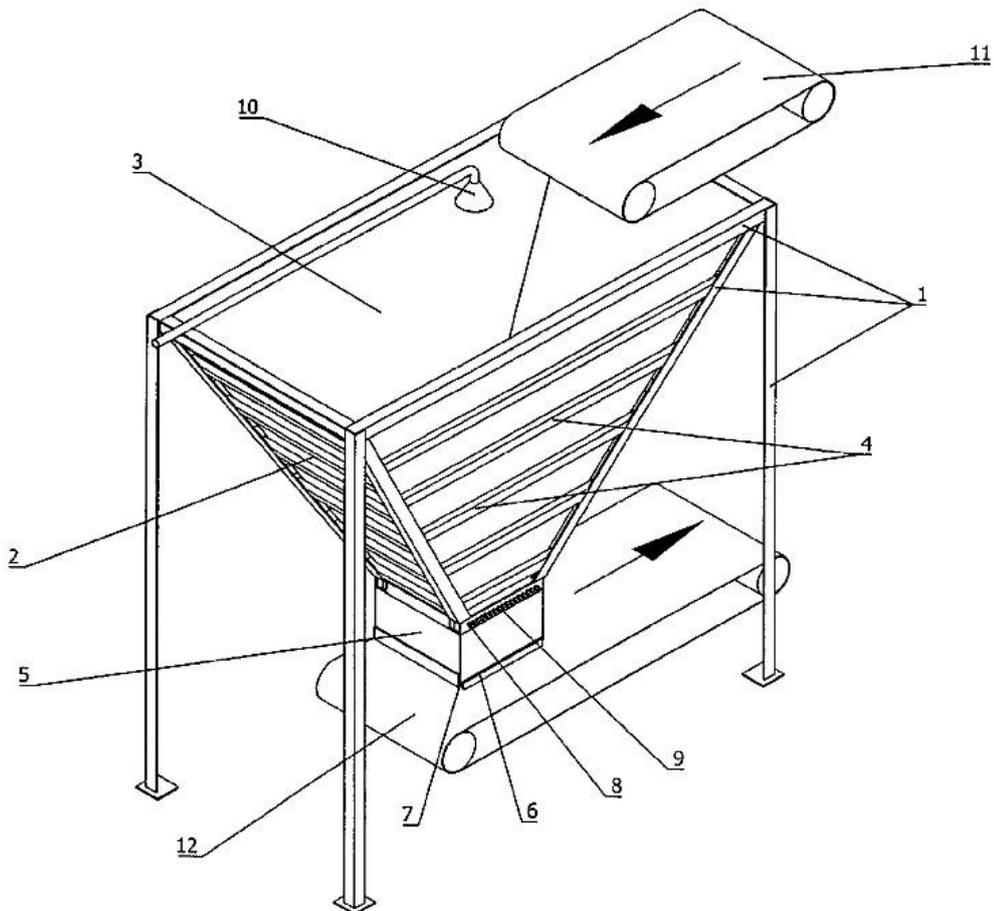


Рисунок 1.14 – Вермикомпостер для комплексной очистной установки:  
 1 – опоры; 2 – бункер; 3 – стенка бункера; 4 – ребра жесткости; 5 – выгрузочный патрубок; 6 – заслонка; 7 – пазы; 8 – отверстия; 9 – спицы; 10 – устройство для увлажнения субстрата, 11 – транспортер для загрузки субстрата; 12 – транспортер для выгрузки вермикомпоста

Вермикомпостер для комплектной очистной установки представляет собой ложе на опорах для выращивания вермикультуры, оснащенное системой приспособлений для полива вермикомпоста, укрывания от попадания прямых солнечных лучей в летнее время и подогрева в зимнее время, внесения компостируемых отходов и выемки готового компоста. Ложе выполнено в виде обратной усеченной пирамиды с открытым верхним основанием, с открывающимся люком в нижнем основании и отверстиями в боковой поверхности. Отверстия диаметром не менее 10 мм выполнены в виде горизонтального ряда с шагом не более 20 мм. Они служат для вставки спиц, отсекающих верхнюю часть компоста от нижней, выгружаемой из устройства при открытии люка в нижнем основании.

Недостатком данного устройства является отсутствие механизма устранения налипания вермикомпоста со стенок установки, что приводит к снижению производительности устройства [21].

Известно также устройство для компостирования с использованием вермикультуры (рисунок 1.15), защищенное патентом на изобретение № 2244698 (подобные патенты – на полезную модель № 2101267, на изобретение № 94036427) [24, 25, 26]. Оно может быть использовано в фермерских хозяйствах, а также частных домовладениях для утилизации отходов, образующихся в результате жизнедеятельности людей, животных и при переработке отходов растениеводства, птицеводства и животноводства с использованием вермикультуры.

Устройство для компостирования с использованием вермикультуры содержит корпус, расположенный горизонтально, перфорированный элемент для размещения перерабатываемых отходов и вермикультуры и средство для воды. Корпус выполнен в виде цилиндрического сегмента, перфорированный элемент расположен на расстоянии 50–75 % радиуса цилиндрического сегмента от его оси. Средство для воды представляет собой часть цилиндрического сегмента, расположенную под перфорированным элементом. Устройство снабжено рамой, на которой установлен корпус с возможностью подъема на угол до 45°, снабженный в торцах заслонками для выгрузки содержимого и патрубками для ввода и вывода воды [24].

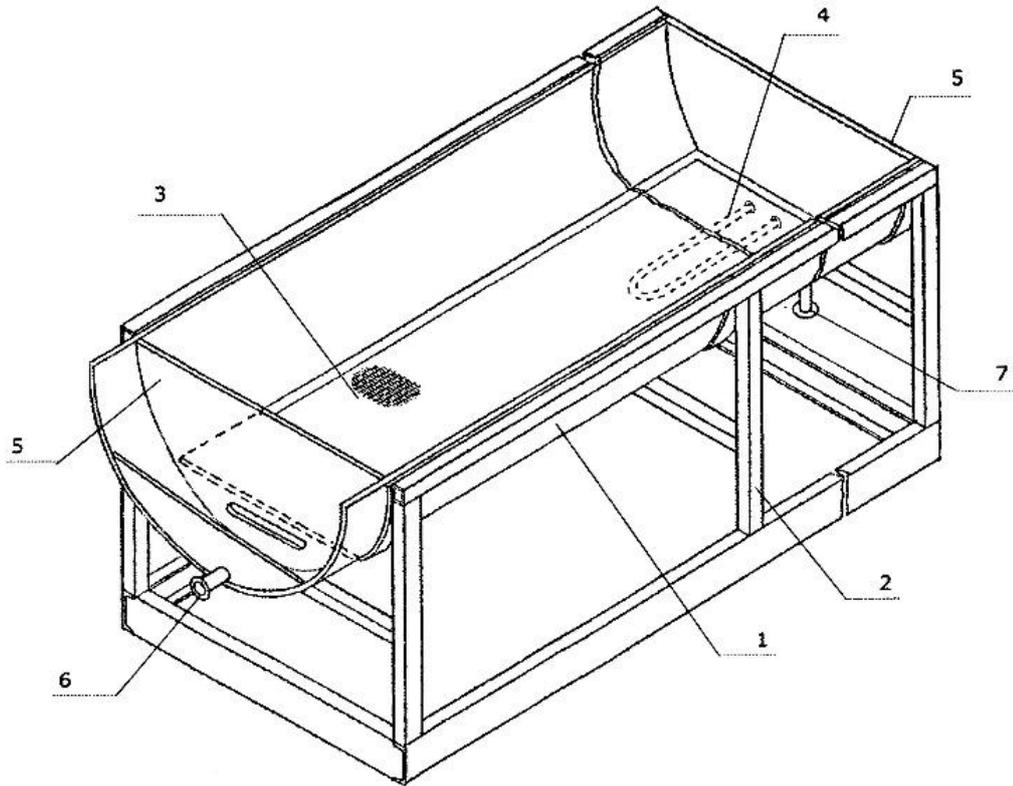


Рисунок 1.15 – Устройство для компостирования с использованием вермикультуры:

- 1 – цилиндрический корпус; 2 – опорная рамка; 3 – перфорированный элемент;  
 4 – нагревательный элемент; 5 – боковая заслонка; 6 – патрубок для ввода воды;  
 7 – патрубок для удаления излишек воды

Недостатками данного устройства являются отсутствие средств механизации технологических процессов загрузки субстрата и выгрузки вермикомпоста, а также средств контроля влажности субстрата.

Существующее устройство для переработки органических отходов (рисунок 1.16) в вермикомпост, защищенное патентом на изобретение № 2108998 (подобные патенты на изобретение – № 2227129, № 2018224), используется при производстве удобрений (в частности, вермикомпоста) из органических отходов [22, 28, 29]. При данном способе формируют ложе из компоста с заселением его вермикультурой. При этом производят постепенное наращивание слоя, необходимого для миграции, путем добавления компоста непосредственно на поверхностный слой с сохранением ложа до периода полного созревания вермикультуры, вышедшей из отложенных в ложе коконов, и полной миграции из первоначального слоя как старых, так и молодых червей. Удаляют лишь полностью переработанный нижний слой.

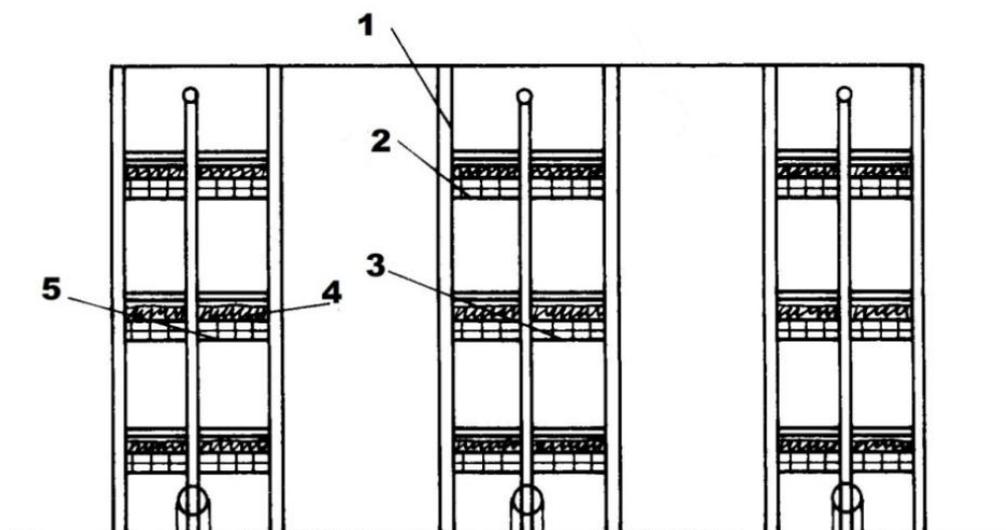


Рисунок 1.16 – Устройство для переработки органических отходов:  
1 – стойка; 2 – ярус; 3 – поддон; 4 – ложе; 5 – направляющая

Устройство для переработки органических отходов в вермикомпост включает в себя многоярусный стеллаж с вертикальными стойками, ярусы которого снабжены поддонами, служащими основаниями для лож с заселенным вермикulturой компостом, а вертикальные стойки имеют направляющие для установки дополнительных поддонов для формирования новых лож, заселяемых мигрирующими вверх червями [27].

Недостатками данной конструкции являются отсутствие средств механизации для выполнения технологического процесса и сложность заполнения верхних ярусов установки субстратом.

### **1.5. Классификация технических средств, применяемых для производства вермикомпоста**

Проведя анализ существующих технологий и технических средств производства вермикомпоста, мы создали предпосылки для разработки классификации способов производства вермикомпоста. Резюмируя выполненный анализ, можно отметить, что существуют различные технологические способы производства вермикомпоста и технические средства для их осуществления.

Большое распространение получил стеллажный способ производства вермикомпоста. Его преимущественно используют в районах с суровым климатом в закрытых помещениях. Для него характерно использование таких технических

средств, как ящики, поддоны и формирование стеллажей с помощью сплошных или перфорированных листов. В редких случаях в качестве стеллажа применяют ленточные транспортеры. Данный способ вермикультивирования обладает частичной мобильностью и потенциалом полной механизации, а затем и автоматизации процесса за счет создания технических средств для полива вермикомпоста, загрузки субстрата и выгрузки готового продукта. Основным недостатком данного метода можно считать повышенную материалоемкость и вследствие этого ограничения в размерах лотков и иных устройств, использующих в своей основе данный метод.

Грядно-траншейный способ производства вермикомпоста характерен для регионов с мягкими климатическими условиями, так как производство вермикомпоста осуществляется на открытых площадках в грядках. Данный способ считается наиболее механизированным на сегодняшний день, но имеет малый потенциал для автоматизации процесса.

В регионах с умеренным климатом возможно применение неглубоких траншей с бортами, облицованными деревянными досками. Их заполняют субстратом и заселяют вермикультурой. В зимний период производство вермикомпоста приостанавливают, а траншеи накрывают пленкой для исключения промерзания субстрата.

Производство вермикомпоста в бетонных лотках в помещениях с искусственным микроклиматом позволяет компенсировать данный недостаток. При использовании этого метода возможно добиться круглогодичного вермикомпостирования, что повысит рентабельность производства. Основным недостатком является повышенная чувствительность к составу субстрата и объему его увлажнения.

Грядно-лотковый способ вермикультивирования является стационарным, он предполагает продольное распределение субстрата, а его укладка может быть как грядной, так и послойной. К недостаткам данного способа следует отнести большую занимаемую площадь. Этот недостаток вытекает из технических условий

производства вермикомпоста, поскольку высота буртов или глубина траншей должна быть не больше 30 см, а длина может быть произвольной.

Курганный способ производства вермикомпоста является стационарным и реализуется с помощью специальной установки (патент на изобретение № 2050341). Субстрат послойно загружают тельфером и ковшом кольцевым способом распределения при помощи формообразующей стенки, благодаря чему субстрат приобретает форму кургана [27]. Внутри кургана размещают перфорированные трубы для обеспечения аэрации в толще вермикомпоста. Данный способ не получил широкого распространения, так как характеризуется большой материалоемкостью и значительными капитальными затратами для производства вермикомпоста.

При бункерном способе производства вермикомпоста (патент на изобретение № 2054405) субстрат распределяют по шахтам с помощью горизонтального транспортера, а затем заселяют вермикультурой [30]. Выгрузка готового вермикомпоста осуществляется через наклонные транспортеры в транспортные средства. Данный способ является полностью механизированным и имеет непрерывный цикл производства, но он не нашел своего применения на предприятиях из-за значительной материалоемкости и еще больших капитальных затрат.

Таким образом, выполненные исследования позволяют сформировать классификацию способов производства вермикомпоста при использовании различных технологических процессов и технических средств для их обеспечения. В итоге разработана классификация способов производства вермикомпоста, которая представлена на рисунке 1.17.

На основании представленной классификации можно определить недостатки существующих устройств для вермикомпостирования и направления для совершенствования их конструкции.

Все существующие способы и технические средства в значительной степени зависят от ручного труда для выполнения ключевых технологических операций, таких, как загрузка субстрата, его распределение, аэрация, контроль параметров среды и, что особенно трудоемко, отделение вермикультуры от готового продукта. Это приводит к низкой производительности, высоким затратам и делает процесс малорентабельным для крупнотоварного производства.

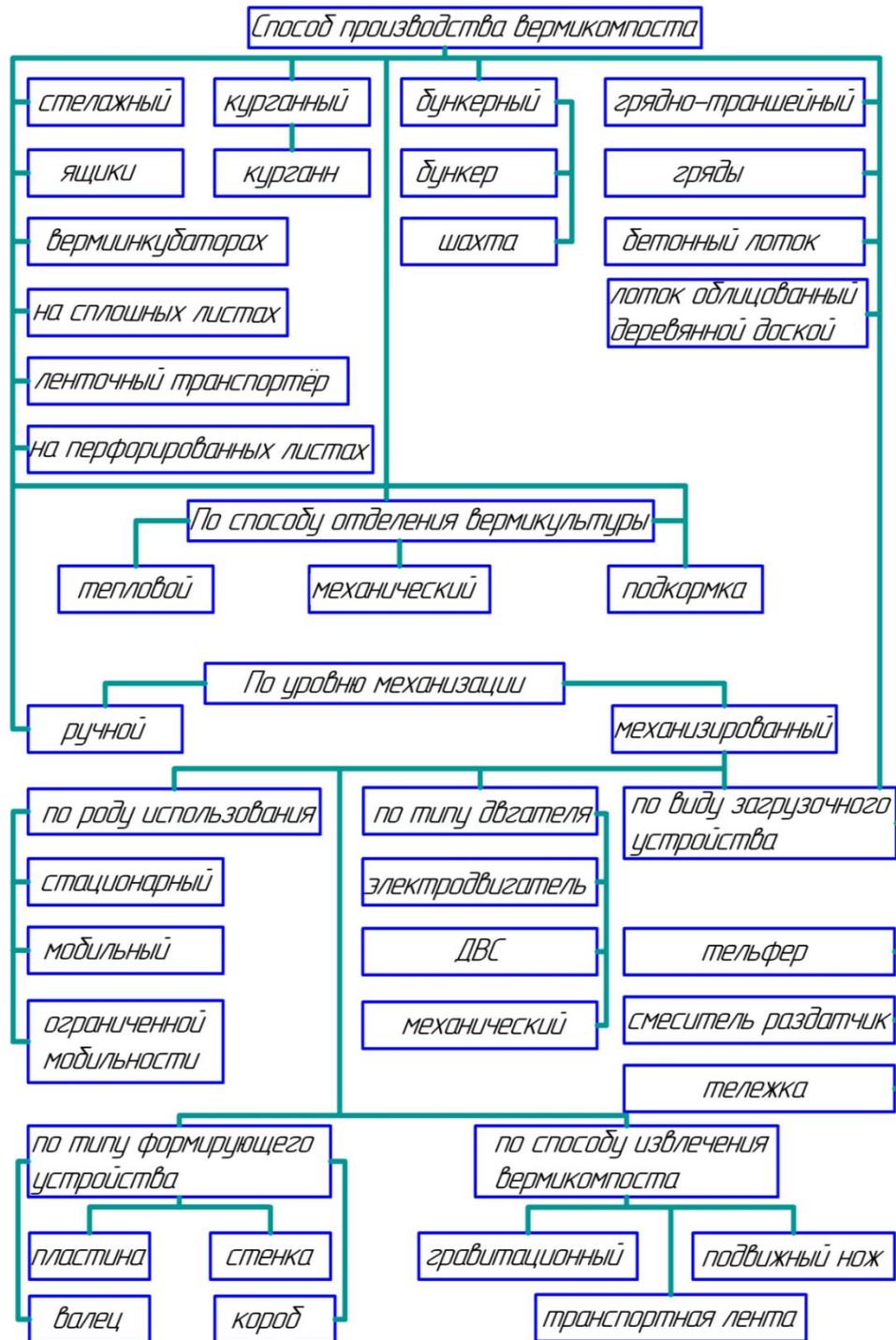


Рисунок 1.17 – Классификация способов производства вермикомпоста

Широко распространенные стелажные, ящичные и грядно-траншейные способы характеризуются высокой металлоемкостью и значительной занимаемой площадью при относительно малом объеме перерабатываемого субстрата. Кроме того, они часто жестко привязаны к конкретным климатическим условиям: открытые площадки не пригодны для регионов с суровым климатом, а организации

круглогодичного производства в помещениях требуют больших капитальных затрат на строительство и поддержание микроклимата.

Бункерный и курганный способы, хотя и являются более механизированными, не получили широкого распространения из-за чрезвычайно высокой сложности конструкций, большой материалоемкости и необходимости в высококвалифицированном обслуживающем персонале. Их внедрение экономически не оправдано для большинства хозяйств.

Таким образом, основными проблемами внедрения технологии вермикомпостирования являются отсутствие доступных, малозатратных и эффективных технических средств, обеспечивающих непрерывный цикл производства вермикомпоста. Дальнейшие исследования и разработки должны быть направлены на создание модульных установок, сочетающих преимущества стационарного и мобильного способов. Перспективным направлением является механизация наиболее трудоемких операций. Решение данной проблемы позволит снизить металлоемкость и энергоемкость установок, повысить производительность труда и сделать процесс вермикомпостирования более рентабельным для предприятий различного масштаба.

#### **1.6. Анализ существующих исследований рабочих органов технических средств, применяемых для производства вермикомпоста**

Производство вермикомпоста представляет собой сложный процесс, эффективность которого зависит от применяемого технического оснащения. Особое значение имеют конструктивные особенности рабочих органов, отвечающих за выполнение ключевых технологических операций: подготовку питательного субстрата, его аэрацию, поддержание оптимальных параметров микроклимата, а также выемку готового органического удобрения.

Анализ существующих научных и патентных разработок в данной области позволяет выявить основные тенденции, установленные закономерности и нерешенные проблемы, что является критически важным для дальнейшего совершенствования технологии.

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 [31, 32], 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 [33, 34, 35, 36, 37].

Теоретические вопросы внедрения рабочего органа в органический материал изучались М. Е. Мацепуро, Н. В. Павловым, П. И. Павловым, Л. В. Гвоздевой, А. О. Везириным [38, 40, 41, 42, 43].

Согласно теории В. П. Горячкина, процесс деформации почвы перед плоским клином представляет собой чередование двух периодически повторяющихся фаз. В первой фазе по мере перемещения клина из начального  $O$  в новое положение  $O_1$  происходят сжатие почвенного массива непосредственно перед клином и вдавливание его частиц в ещё не нарушенную, недеформированную зону грунта. Во второй фазе в почве, расположенной впереди режущей кромки клина, формируется плоскость сдвига  $O_1A_1$ , наклонённая под углом  $\psi_1$  (град.) к дну борозды. Значение этого угла определяется следующим соотношением:

$$\psi_1 = (\pi - \alpha + \varphi + \varphi_1) / 2, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – угол постановки прямоугольного клина к дну борозды, град.;

$\varphi$  – угол трения почвы по материалу клина, град.;

$\varphi_1$  – угол внутреннего трения почвы, град.

Более применимой формулой для исследования процесса резания вермикомпоста может служить формула В. П. Горячкина для определения силы тяги плуга  $P$  (Н) [31, 32]:

$$P = f_n G + pbh + kpbhv_{гр}^2, \quad (1.2)$$

где  $f_n$  – коэффициент трения плуга о грунт;

$G$  – масса плуга, кг;

$p$  – удельное сопротивление деформации Н/мм<sup>2</sup>;

$b$  и  $h$  – соответственно ширина и высота пласта, мм;

$k$  – коэффициент, зависящий от формы рабочей поверхности отвала и свойств почвы;

$v_{гр}^2$  – скорость перемещения грунта, м/с.

Рациональная формула В. П. Горячкина описывает процесс обработки пахотного слоя клиновидным рабочим органом, не учитывая форму клина и не полностью учитывая физико-механических свойств почвы в процессе обработки.

М. Е. Мацепуро заложил основы для развития современных технологий в области механизации сельского хозяйства, включая теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия рабочих элементов погрузчиков и другой сельскохозяйственной техники. Полученные им аналитические и экспериментальные зависимости позволяют количественно оценить сопротивление внедрению в материал как прямолинейных, так и криволинейных рабочих органов, учитывая геометрические параметры их профиля, физико-механические свойства обрабатываемой среды и условия взаимодействия. [104].

Установлено, что сопротивление внедрению цилиндрической части  $R_{ц}$  (кг/см<sup>2</sup>) находится в линейной зависимости от глубины внедрения  $H$  [43]:

$$R_{ц} = \pi d_0 f_{ц} \sigma_y \left( H - \frac{d_0}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (1.3)$$

где  $R_{ц}$  – сопротивление внедрению цилиндрической части, кг/см<sup>2</sup>;

$d_0$  – диаметр основания, м;

$H$  – глубина внедрения конуса, м;

$\alpha$  – угол при вершине конуса, град.

Результаты проведённых исследований легли в основу методик, применяемых при расчёте погрузчиков напорного действия, грейферных погрузчиков и бульдозеров, а также при разработке теоретических моделей в рамках аналитической механики взаимодействия рабочих органов погрузочных машин с органическими удобрениями.

В трудах Н. В. Павлова детально рассмотрены вопросы теоретического и экспериментального анализа процесса взаимодействия рабочих органов фрезерно-барабанного питателя погрузчика с органическими удобрениями, включая особенности передачи усилий, характер деформации материала и энергетические затраты при его захвате и перемещении [38].

В ходе проведённых исследований было выведено уравнение, позволяющее определить мощность, необходимую для отделения части навоза от основного массива. Данное уравнение учитывает физико-механические свойства навоза, геометрические параметры рабочего органа, а также условия взаимодействия между ним и обрабатываемым материалом [38]:

$$N_{\text{cp}} = \frac{Q}{\eta_{\text{м}}} \left[ \frac{A_s \eta_{\text{вэ}} \eta_s \sqrt[3]{n}}{\eta_3 \gamma} + \frac{\eta P_0^2}{\eta_3 \gamma \eta_0 k} \frac{\text{Inch} \left( \frac{k}{p} l \right)}{l} + \frac{gfl}{\eta_3} \left[ \frac{\eta_A}{\eta_0} + \eta_{\text{по}} + \frac{\eta_B \eta_l}{2\eta_0^2} \text{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] + gh + \frac{v^2}{2} \right], \quad (1.4)$$

где  $N_{\text{cp}}$  – средняя мощность при погрузке, Вт;

$Q$  – производительность погрузчика, т/ч;

$A_s$  – суммарная работа, Дж;

$n$  – частота вращения фрез барабана, об/мин;

$\gamma$  – объемный вес материала, т;

$P_0$  – предел несущей способности материала, Па;

$k$  – коэффициент пропорциональности;

$p$  – шаг зубьев, м;

$l$  – длина стенки, м;

$f$  – коэффициент внешнего трения;

$\varphi$  – угол внутреннего трения, град.;

$\eta_{\text{м}}, \eta_{\text{вэ}}, \eta_s, \eta_3, \eta_k, \eta_A, \eta_0, \eta_{\text{по}}, \eta_l, \eta_B$  – коэффициенты.

В своих теоретических построениях автор принимал за основу допущение, что выделяемая погрузчиком порция органических удобрений в общем случае имеет

форму прямоугольного параллелепипеда – тем самым рассматривался максимально обобщенный геометрический случай формирования загружаемого объема. Следовательно, формула (1.4) в большей степени ориентирована на описание работы ковшовых погрузчиков периодического действия. В случае погрузчиков непрерывного действия ключевую роль играют режимы функционирования, скорости движения как рабочих органов, так и всего агрегата в целом, однако данные параметры напрямую в формулу (1.4) не включены. Кроме того, в указанное выражение не входят прочностные характеристики органических удобрений.

Исследования рабочих органов погрузчиков навоза непрерывного действия были выполнены П. И. Павловым [39]. Основной акцент в работе сделан на решение задачи ресурсосбережения при погрузке различных видов навоза от свежего до частично перепревшего. В исследованиях детально проанализированы кинематические и динамические характеристики движения рабочих органов. Их результатом стало создание механико-математической базы для проектирования питателей, а также научное обоснование конструктивных параметров их рабочих элементов с учётом реальных условий эксплуатации [40]. На основе полученных данных были разработаны аналитические зависимости для расчёта производительности питателей, в которых учтены все существенные конструктивные и технологические параметры: геометрия рабочих органов, частота вращения, физико-механические свойства навоза и особенности его транспортирования:

$$Q = \frac{\rho z_t \omega k_0 H}{2\pi} \left[ \frac{v_{II} R_p}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{R_p^2 \omega \cos \alpha}{2} t - \frac{R_p^2 \cos \alpha}{4} \sin(2\omega t) \right], \quad (1.5)$$

где  $Q$  – производительность, кг/с;

$\rho$  – плотность навоза, кг/м<sup>3</sup>;

$z_t$  – число лопастей ротора в массиве груза в момент времени  $t$ , шт.;

$\omega$  – угловая скорость вращения лопастей, рад/с;

$k_0$  – коэффициент заполнения рабочего объема;

$H$  – высота лопасти, м;

$v_{\pi}$  – поступательная скорость питателя, м/с;

$R_p$  – радиус ротора, м;

$t$  – время, с;

$\alpha$  – угол наклона траектории движения к плоскости, град.

Мощность на привод определяется суммой мощности на фрезерование  $P_p$  (Вт) и мощности на транспортирование  $P_{пер}$  (Вт):

$$P_p = \sigma_p b h k_{\xi} z_t l_2 \frac{\omega}{\pi}; \quad (1.6)$$

$$P_{пер} = \rho k_0 H z_t (1 + f) \left[ \frac{v_{\pi} R_p}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{R_p^2 \omega \cos \alpha}{2} t - R_p^2 \frac{\cos \alpha}{4} \sin(2\omega t) \right] \times \\ \times \left( \frac{\omega^3 R_p^2}{\pi} + g \omega R_p (f + \sin \alpha) \right), \quad (1.7)$$

где  $\rho$  – плотность органических удобрений, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – высота лопасти, м;

$k_{\xi}$  – коэффициент изменения толщины режущей кромки при работе лопасти;

$z_t$  – число лопастей, отделяющих навоз в момент времени  $t$ , шт.;

$l_2$  – длина траектории движения режущей кромки лопасти, м;

$\rho$  – плотность органических удобрений, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – время прохождения режущей кромкой траектории  $l_2$ ,  $t = 1 / (2n) = \pi / \omega$ , с;

$R_p$  – радиус лопастей, м;

$\omega$  – угловая скорость лопастей, рад/с.

В ходе теоретических исследований А. О. Везиров изучил влияние формы зубьев на степень смешивания тепличного грунта и вывел аналитическое выражение для суммарного усилия резания почвенной смеси всеми зубьями в заданный момент времени [42].

Суммарное усилие резания всеми зубьями в момент времени  $t$  (Н):

$$\sum F = z_t \sigma_p b h \sin \left( \varphi_{\text{тр}} + \frac{\gamma}{2} \right), \quad (1.8)$$

где  $z_t$  – число зубьев в массиве груза в момент времени, шт.;

$\sigma_p$  – напряжение резания компонентов почвы, МПа;

$b$  – толщина режущей кромки, мм;

$h$  – высота по передней до задней кромке зуба, м;

$\varphi_{\text{тр}}$  – угол трения почвенного компонента по стали, град.;

$\gamma$  – угол при вершине зуба, град.;

Уравнение (1.8) может быть использовано для теоретического обоснования оптимального значения угла  $\gamma$  в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Экспериментально установлено, что минимальное усилие внедрения достигается при  $\gamma = 113,5^\circ$ . При решении аналогичной задачи с учетом коэффициентов трения компонентов почвенной смеси в качестве расчетных значений приняты: угол  $\gamma = 110^\circ$  и угол заточки  $\alpha = 60^\circ$ .

Анализ имеющихся исследований технических средств, используемых при работе с вермикомпостом, свидетельствует о недостаточной проработке вопросов, связанных с рабочими органами устройств для извлечения вермикомпоста из вермиинкубаторов. Существующие разработки и соответствующие исследования, как правило, не учитывают специфические физико-механические свойства вермикомпоста, существенно отличающиеся от характеристик других сыпучих или полужидких органических материалов. Вследствие этого отсутствует научно обоснованная база для проектирования оборудования, адаптированного к условиям обработки именно этого материала. Это приводит к снижению производительности технологических операций, росту трудозатрат и энергозатрат, что в конечном итоге уменьшает общую эффективность процесса вермикомпостирования.

### **1.7. Цель и задачи**

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

**Задачи:**

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 его конструктивно-режимные параметры и провести теоретический анализ процесса извлечения готового продукта из вермиинкубатора.

3. Разработать методику экспериментальных исследований и производственных испытаний предлагаемого устройства для вермикомпостирования, а также 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.

### **1.8. Выводы по главе**

1. Существующие технологии и технические средства для производства вермикомпоста характеризуются высокой трудоемкостью, поскольку до 70–80 % технологических операций, особенно таких критически важных, как выемка готового продукта и отделение вермикультуры, выполняются вручную. Это делает процесс нерентабельным для крупномасштабного производства и сдерживает его широкое внедрение.

2. Широко применяемые способы: стеллажный, ящичный, грядно-траншейный. Они обладают рядом существенных недостатков: они металлоемки, для их реализации необходима большая площадь при небольшой производительности. Кроме того, они часто привязаны к определенным климатическим условиям. Механизированные способы производства вермикомпоста: бункерный и курганный не получили распространения из-за чрезвычайно высокой сложности конструкций, материалоемкости и капитальных затрат, что делает их экономически нецелесообразными для большинства хозяйств.

3. Необходима разработка новых технических решений, направленных на создание модульных малозатратных и эффективных установок. Ключевым направлением совершенствования является механизация наиболее трудоемких операций, в первую очередь процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

4. Специализированных исследований рабочих органов для работы с вермикомпостом, обладающих уникальными физико-механическими свойствами, недостаточно. Следовательно, необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования, целью которых должно стать обоснование конструктивно-технологических параметров извлекающего рабочего органа, что позволит создать адаптированное техническое средство, обеспечивающее повышение производительности производства вермикомпоста в вермиинкубаторах.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫПОЛНЯЕМОГО ТЕХНИЧЕСКИМ СРЕДСТВОМ ДЛЯ ВЫЕМКИ ВЕРМИКОПОСТА ИЗ ВЕРМИИНКУБАТОРА**

На основе выполненного анализа технологий и технических средств производства вермикомпоста, а также теоретических исследований процессов взаимодействия рабочих органов с материалом предложены технологический процесс и техническое средство для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

### **2.1. Разработка технологического процесса и технического средства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора**

Разработана техническая установка с целью получения экологически чистого органического удобрения вермикомпоста на основе переработки органических отходов растительного и животного происхождения с помощью вермикультуры.

Установка для производства вермикомпоста (рисунок 2.1) содержит секцию 1, нижнее основание 2, которое представляет сетчатую поверхность с равноудаленными отверстиями. Стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами 3. Кроме того, на нижнем основании 2 установлен нож, выполненный сварным методом из лезвия 4 и направляющих 5. Механизм, приводящий в движение нож, представляет собой мотор-редуктор 6, в который вмонтированы два вала 7 со шкивами, натягивающими канат. При этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства 8. На задней стенке секции закреплена ось 9 с канатами.

Технологический процесс предложенной установкой осуществляется следующим образом. В секцию 1 загружают субстрат, состоящий из одной части перепревших опилок, сена или соломы, древесной листвы; одной части органических отходов (полежавшего коровьего навоза или птичьего помета), измельченных овощных очисток, листьев, ботвы и других компонентов. Затем субстрат проходит процесс компостирования в течение нескольких дней. Во время этого процесса смесь хорошо прогревают на солнце или добавляют в нее торф с известью. На готовый субстрат выкладывают вермикультуру. Для получения вермикомпоста в помещении, где установлена установка (см. рисунок 2.1), поддерживают определенные температуру и влажность субстрата. При готовности

вермикомпоста его верхний слой в секции 1 срезается ножом, который приводится в движение с помощью мотор-редуктора 6 с вмонтированными в него валом блок 7 натягивающим канат, и осью 9 с канатами. Далее процесс повторяется [5].

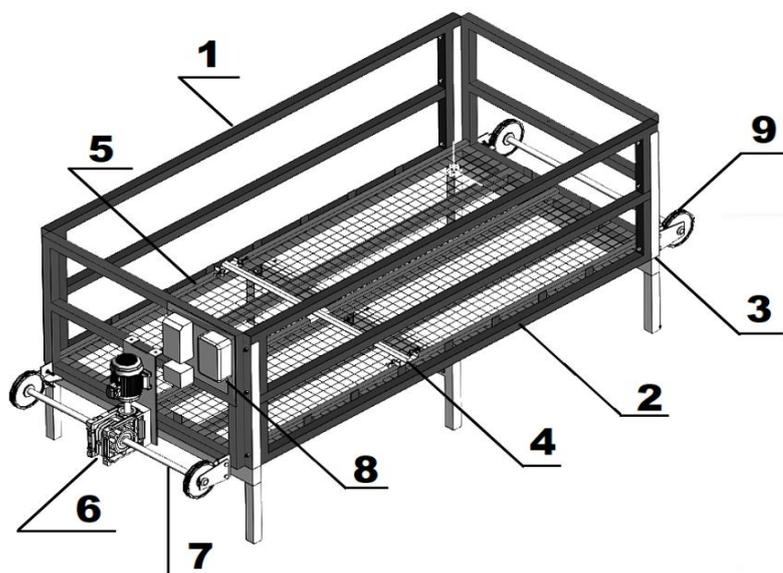


Рисунок 2.1 – Схема устройства для производства вермикомпоста:  
1 – секция; 2 – нижнее основание; 3 – опора; 4 – лезвие; 5 – направляющие;  
6 – мотор-редуктор; 7 – вал; 8 – управляющее устройство; 9 – ось

На разработанную установку для производства вермикомпоста получен патент на полезную модель № 208013 [44].

Для внедрения в производство разработанного технологического процесса и технической установки для получения вермикомпоста необходимо усовершенствовать технологический процесс и определить рациональные параметры, а также режимы работы рабочего органа устройства для отделения готового слоя вермикомпоста в предлагаемой установке.

## 2.2 Предлагаемая технологическая схема производства органического удобрения

Начальным этапом вермикомпостирования (рисунок 2.2) является подготовка субстрата, содержащего растительные остатки, навоз и пищевые отходы материалы, обладающие оптимальным соотношением углерода и азота (C:N в пределах 20:1...30:1), необходимые для биологической активности вермикультуры и микроорганизмов [45, 105]. Важным моментом является удаление посторонних неорганических и потенциально токсичных примесей, что предотвращает вредное воздействие на вермикультуру.

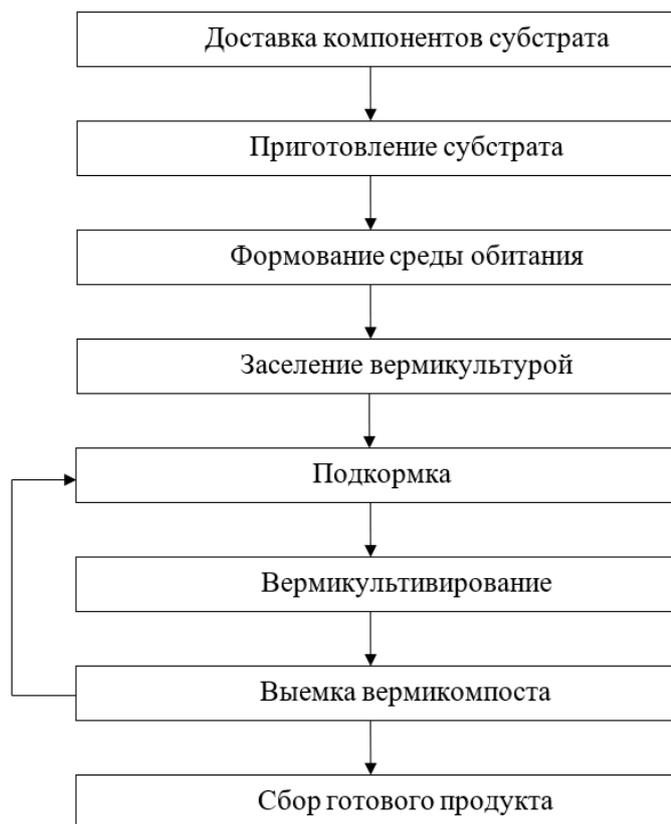


Рисунок 2.2 – Технологический цикл вермикомпостирования

Подготовка субстрата предусматривает измельчение с целью увеличения площади поверхности и улучшения доступности соединений для ферментного расщепления. Контроль влажности на уровне 70–80 % и регуляция pH с помощью известковых добавок обеспечивают нейтральные условия среды (pH 6,5–7,5), что способствует оптимальному развитию как вермикультуры, так и микрофлоры [46, 106]. Термическая предварительная стабилизация субстрата (термофаза при 40...50 °С) снижает фитотоксичность, а также уменьшает содержание патогенных организмов, создавая благоприятный микроклимат.

Формирование среды обитания включает в себя устройство поддерживающего слоя необходимого для предотвращения проваливания субстрата сквозь решетку в момент загрузки. Он состоит из бумаги, соломы или кокосовой койры, являющейся дополнительным источником органических соединений [47]. На подстилку укладывают основной субстрат слоем 15–20 см, обеспечивающий достаточный объем питания для биоконверсии.

Заселение происходит специализированными популяциями *Eisenia fetida*. Этот вид червей характеризуется высокой скоростью размножения, способностью к переработке широкого спектра органики и устойчивостью к колебаниям экологических параметров [48, 107].

Технология поддержки жизнедеятельности подразумевает систематическую подкормку каждые 5–7 дней свежими измельченными органическими отходами с исключением мясомолочных продуктов и жиров, способных вызвать процессы анаэробного брожения и нарушить биологический баланс [86]. Подкормка способствует сохранению оптимального баланса питательных веществ и стимулирует активное размножение вермикультуры.

Ключевой этап – вермикультивирование, оно осуществляется при строго контролируемых параметрах температуры 25–27 °С и влажности 70–80 %, которые обеспечивают максимальную биологическую активность вермикультуры и микрофлоры. При этом транспорт кислорода поддерживается рыхлостью субстрата, предотвращая развитие безвоздушных зон и токсичных соединений [87, 110]. В процессе происходит интенсивное расщепление органики с образованием низкомолекулярных гуминовых веществ и аккумуляцией биогенных питательных элементов.

Процесс завершается выемкой вермикомпоста после 14–18 дней, когда выманка кормом стимулирует миграцию вермикультуры в верхний слой, что облегчает отделение готового продукта и обеспечивает отделение от вермикультуры.

Готовый продукт – высокоценное удобрение, содержащее в среднем 0,1–2,0 % азота, 0,1–2,0 % фосфора и 0,3–0,8 % калия, а также комплекс полезных микроорганизмов с улучшенными физиологическими параметрами [88]. Микробиологические исследования выявили в вермикомпосте повышенное количество бактерий, обладающих активными ферментами, а также уменьшение количества нематод и грибов по сравнению с обычным компостом, что указывает на высокое качество продукта [50, 108].

### 2.3. Теоретическое обоснование прохождения вермикомпоста через сито

Рассмотрим элемент массива вермикомпоста, отсеченный от основной массы лезвием ножа и расположенный между его фронтальной гранью и ситом. На данный массив будут действовать следующие силы (рисунок 2.3):

$G$  – сила тяжести отсеченной части массива, Н:

$$G = M_M g, \quad (2.1)$$

где  $M_M$  – масса отсеченной части массива, кг;

$F_{д.н.}$  – 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 сетчатого решета, Н;

$F_{тр}$  – сила трения массы вермикомпоста о поверхность ножа, Н:

$$F_{тр} = F_{д.н.} f_n, \quad (2.2)$$

где  $f_n$  – коэффициент трения.

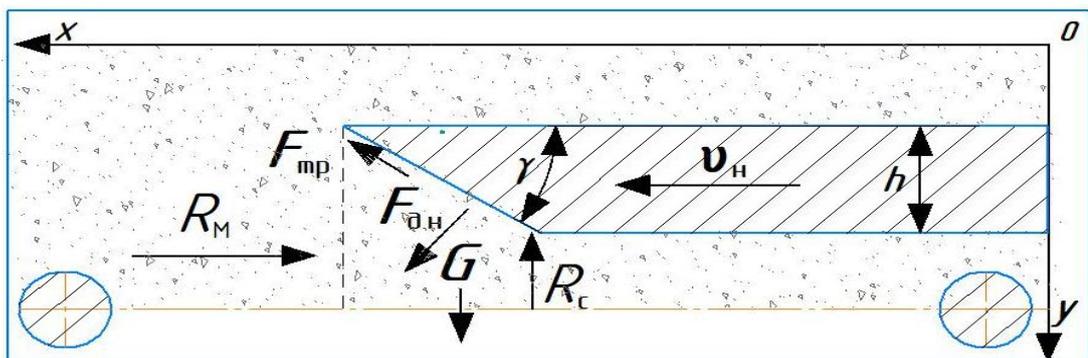


Рисунок 2.3 – Схема сил, действующих на элемент массива вермикомпоста

Массу массива  $M_M$  (кг) можно выразить через произведение плотности вермикомпоста на объем отсеченной части, которая упрощенно представляет собой треугольную призму:

$$M_M = 0,5\rho_B l_H h_H^2 \text{ctg } \beta, \quad (2.3)$$

где  $\rho_B$  – плотность вермикомпоста;  $\rho_B = 485 \dots 860$  кг/м<sup>3</sup> при влажности  $W = 50\text{--}85$  % [51];

$l_H$  – длина ножа, м;  $h_H$  – высота ножа, м;

$\beta$  – угол заострения ножа, град.

Сила тяжести отсеченной части массива с учетом выражения (2.3) примет вид:

$$G = 0,5g\rho l_H h_H^2 \text{ctg } \beta, \quad (2.4)$$

Усилие  $R_M$  можно определить как произведение горизонтального напряжения  $\sigma_x$ , действующего в массе вермикомпоста, на площадь поверхности  $S_{\text{пов}}$ , на которую это напряжение приходится:

$$R_M = \sigma_x S_{\text{пов}}. \quad (2.5)$$

Горизонтальное напряжение от собственной массы вермикомпоста на глубине  $z$  находится из уравнения обобщенного закона Гука для плоского деформированного состояния с учетом того, что относительная деформация в направлении оси  $x$  равна нулю [91]:

$$\sigma_x = \gamma_B z \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad (2.6)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\gamma_B$  – удельный вес вермикомпоста, Н/м<sup>3</sup> [52]:

$$\gamma_B = \rho_B g. \quad (2.7)$$

Тогда с учетом выражения (2.6) и поперечных размеров ножа формула (2.5) примет вид:

$$R_M = \Delta h_B l_H h_H \rho_B g \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad (2.8)$$

где  $\Delta h_B$  – высота слоя вермикомпоста, расположенного над ситом, м.

Для теоретического определения реакции  $R_c$  рассмотрим массу вермикомпоста с точки зрения механики грунтов. Она представляет собой связную сыпучую среду. Если принять незначительным напряжение, действующее на фронтальные боковые стенки, то массу вермикомпоста будет характеризовать состояние плоского предельного равновесия связной сыпучей среды (рисунок 2.4), которое описывается двумя дифференциальными и одним алгебраическим уравнениями, выведенными В. В. Соколовским [53]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \gamma_k; \\ \left( \sigma_x - \sigma_y \right)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \sin^2 \varphi_0 \left( \sigma_x + \sigma_y + \frac{2c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right)^2, \end{array} \right. \quad (2.9)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  – компоненты напряжения, Па;

$\varphi_0$  – угол внутреннего трения, рад;

$c$  – удельное сцепление, Па.

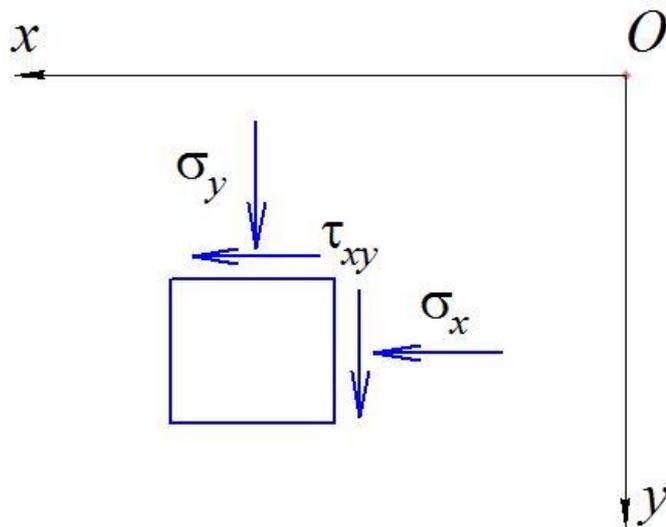


Рисунок 2.4 – Компоненты напряжения при плоском напряженном состоянии

Решение для выражений (2.9) было получено В. В. Соколовским как системы уравнений гиперболического типа методами численного интегрирования. На

основании выбранных краевых условий им получены решения ряда плоских задач предельного равновесия механики сыпучих тел [89, 53]. Однако данные решения не подходят для нашего случая взаимодействия связной сыпучей массы с сетчатым решетом.

Представим упрощенную модель массы вермикомпоста, расположенную на ситовой поверхности, в виде совокупности квадратных пластин со стороной размером  $a$  и высотой  $h_n$ , которые шарнирно опираются всеми четырьмя кромками на поверхность решета (рисунок 2.5) [52]. Действие верхней части всей массы вермикомпоста на нижний слой, контактирующий с решетом, заменим равномерно распределенной нагрузкой с интенсивностью  $q$ .

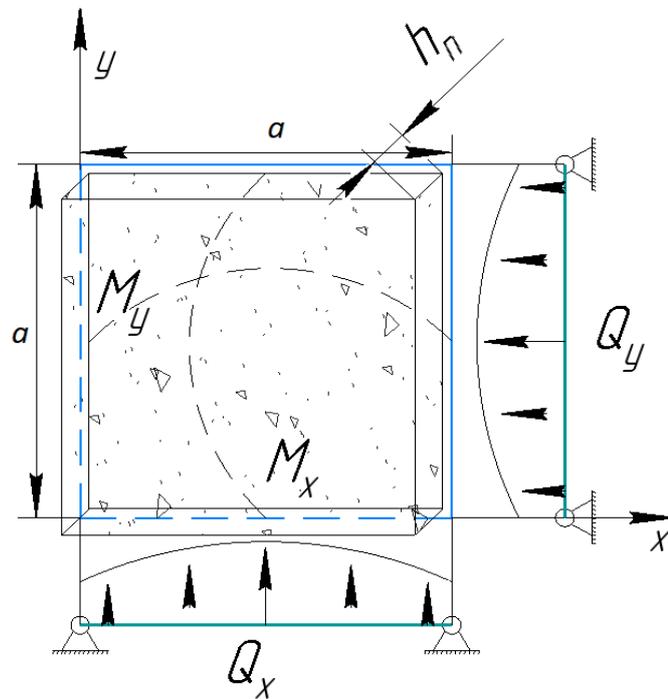


Рисунок 2.5 – Схема шарнирно опертой пластины

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 [54, 55].

Моменты  $M_x$  и  $M_y$  (см. рисунок 2.5) при продавливании пластины вермикомпоста через ячейку дна установки за счет увеличения жесткости от

ребер пластины увеличиваются и достигают своего максимального значения в ее центре, что способствует обрушению пластины и прохождению ее через днище установки.

Максимальные значения указанных внутренних усилий для квадратной пластины (принимая величину коэффициента Пуассона  $\mu = 0,3$ ) [52]:

$$M_x^{\max} = M_y^{\max} = 0,0479qa^2; \quad (2.10)$$

$$Q_x^{\max} = Q_y^{\max} = 0,338qa. \quad (2.11)$$

При этом напряжения, возникающие в пластине под действием внутренних усилий [56, 57]:

$$\sigma_x^{\max} = \frac{6M_x}{h_{\Pi}^2}; \quad \sigma_y^{\max} = \frac{6M_y}{h_{\Pi}^2}; \quad (2.12)$$

$$\tau_{xz}^{\max} = \frac{3Q_x}{2h_{\Pi}}; \quad \tau_{yz}^{\max} = \frac{3Q_y}{2h_{\Pi}}. \quad (2.13)$$

Преобразуем выражения (2.12) и (2.13) с учетом формул (2.10) и (2.11):

$$\sigma_x^{\max} = \sigma_y^{\max} = \frac{0,2874qa^2}{h_{\Pi}^2}; \quad (2.14)$$

$$\tau_{xz}^{\max} = \tau_{yz}^{\max} = \frac{0,507qa}{h_{\Pi}}. \quad (2.15)$$

Запишем условия прочности для нормальных и касательных напряжений. Так как нормальные напряжения достигают максимума в одной точке – центре пластины [6], то с учетом принципа независимости действия сил максимальное нормальное напряжение  $\sigma_{\max}$ :

$$\sigma_{\max} = \sigma_x^{\max} + \sigma_y^{\max} = \frac{0,5748qa^2}{h_{\Pi}^2}. \quad (2.16)$$

Условие прочности будет иметь вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{0,5748qa^2}{h_{\Pi}^2} \leq \sigma_{\text{adm}}, \quad (2.17)$$

где  $\sigma_{\text{adm}}$  – допускаемое нормальное напряжение; для вермикомпоста  $\sigma_{\text{adm}} = 1,9$  кПа [58].

Касательные напряжения будут достигать максимума в четырех точках – посередине сторон контура пластины, для них условие прочности выглядит следующим образом:

$$\tau_{\max} = \frac{0,507qa}{h_{\Pi}} \leq \tau_{\text{adm}}, \quad (2.18)$$

где  $\tau_{\text{adm}}$  – допускаемое касательное напряжение, для вермикомпоста  $\tau_{\text{adm}} = 0,55$  кПа [58].

Сравнивая выражения (2.17) и (2.18), можно отметить, что в случае превалирования размеров сита  $a$  над высотой слоя  $h_{\Pi}$  масса вермикомпоста будет проходить через решето, разрушаясь преимущественно в центральных точках пластин под действием внутренних изгибающих моментов. В случае, когда величина слоя материала  $h_{\Pi}$  превалирует над размером ячеек сита  $a$ , разрушение нижнего слоя будет обуславливаться преимущественно его перерезанием за счет внутренних сил  $Q_x$  и  $Q_y$ .

Из выражения (2.17) можно вывести величину критического давления  $q_{\text{кр}}$  (Па):

$$q_{\text{кр}} = \frac{h_{\Pi}^2 \sigma_{\text{adm}}}{0,5748a^2}. \quad (2.19)$$

При достижении в нижнем слое вермикомпоста значения давления  $q_{\text{кр}}$  его масса будет проходить через сетчатую поверхность без дополнительного воздействия, только под действием силы тяжести. Если давление ниже  $q_{\text{кр}}$ , то масса вермикомпоста будет оставаться на сетчатой поверхности и потребуются дополнительное воздействие на нее для просеивания.

Вертикальное давление  $q_z$  от собственной массы вермикомпоста на глубине  $z$  может быть найдено по формуле [52]:

$$q_z = \gamma_B z = \rho_B g \Delta h_B. \quad (2.20)$$

Тогда из условия  $q_{кр} > q_z$ , получим размер ячейки сита, при котором масса вермикомпоста будет оставаться на поверхности решета:

$$a < h_{\Pi} \sqrt{\frac{\sigma_{adm}}{0,5748 \rho_B g \Delta h_B}}. \quad (2.21)$$

Суммарная реакция  $R^\Sigma$  (Н/м), действующая на прямоугольную пластину со стороны опор [57]:

$$R^\Sigma = \frac{4qab}{\pi^2} + \frac{8q(1-\mu)}{\pi^2 ab \left[ \left( \frac{1}{a} \right)^2 + \left( \frac{1}{b} \right)^2 \right]^2}, \quad (2.22)$$

где  $a$  и  $b$  – длина и ширина пластины соответственно, м.

Для квадратной пластины со стороной  $a$  формула (2.22) упростится и примет вид:

$$R_{кв}^\Sigma = \frac{2qa^2(3-\mu)}{\pi^2}. \quad (2.23)$$

Данная реакция будет действовать на одну пластину. Тогда реакция всей сетчатой поверхности на массу вермикомпоста:

$$R_c = \frac{qa^2(3-\mu)(2n_1n_2 + n_1 + n_2)}{2\pi^2}, \quad (2.24)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – число отверстий в решете по длине и ширине, шт.

Параметры  $n_1$  и  $n_2$  можно выразить через размеры ситовой поверхности:

$$n_1 = \frac{l_c}{a}; \quad n_2 = \frac{b_c}{a}, \quad (2.25)$$

где  $l_c$  и  $b_c$  – длина и ширина ситовой поверхности, м.

Тогда выражение (2.24) примет вид:

$$R_c = \frac{q(3 - \mu)[2l_c b_c + a(l_c + b_c)]}{2\pi^2}. \quad (2.26)$$

Силу давления  $F_{д.н.}$  выразим через параметры самого ножа, используя равенство  $F_{д.н.} = 3$  и ранее рассмотренную схему сил (см. рисунок 2.3). Можно отметить, что основными усилиями, действующими в вертикальном направлении, являются нормальные реакции  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  и сила тяжести ножа  $G_n$ , причем в общем случае  $G_n$  и  $N_1$  уравниваются  $N_2$  и  $N_3$ .

Усилие  $N_3$  прямо пропорционально нормальному напряжению  $\sigma$  в отделенной от основной массы части вермикомпоста, которое, в свою очередь, увеличивается с ростом величины относительного сжатия  $\varepsilon$  [58]. Следовательно, при работе ножа в зависимости от величины относительной деформации вермикомпоста  $\varepsilon$  и напряжений  $\sigma$  в отделенной части реакция  $N_3$  может менять свое значение. Так как величины сил  $G_n$  и  $N_1$  в процессе работы ножа неизменны, то при уменьшении  $N_3$  реакция  $N_2$  будет расти и наоборот.

Возьмем предельный случай, когда отделенная ножом от основного массива часть вермикомпоста не проходит через сито, а сминается, частично перемещается тонким уплотненным слоем под нож и в основном передвигается ножом в горизонтальном направлении. При этом нормальная реакция  $N_2 \approx 0$ , а реакция  $N_3$ , а следовательно, и  $F_{д.н.}$  достигает максимального значения.

Максимальное значение силы давления ножа на отсеченную часть массива вермикомпоста:

$$F_{д.н.}^{\max} = \frac{g(m_b + m_n)}{\cos \beta - f \sin \beta}. \quad (2.27)$$

После детального рассмотрения сил, действующих на часть вермикомпоста, отделенную ножом от основного массива, спроецируем силы, представленные на рисунке 2.3, на ось  $y$ :

$$G + F_{д.н.} \cos \beta - R_c - F_{тр} \sin \beta = 0. \quad (2.28)$$

После подстановки значений сил получим:

$$0,5g\rho_{\text{в}}l_{\text{н}}h_{\text{н}}^2\text{ctg}\beta + g(m_{\text{в}} + m_{\text{н}}) - \frac{q(3-\mu)[2l_{\text{с}}b_{\text{с}} + a(l_{\text{с}} + b_{\text{с}})]}{2\pi^2} = 0. \quad (2.29)$$

Отсюда выразим давление вермикомпоста на поверхность сита:

$$q = \frac{2\pi^2 g(0,5\rho_{\text{в}}l_{\text{н}}h_{\text{н}}^2\text{ctg}\beta + m_{\text{в}} + m_{\text{н}})}{(3-\mu)[2l_{\text{с}}b_{\text{с}} + a(l_{\text{с}}b_{\text{с}})]}. \quad (2.30)$$

Выражение (2.30) позволяет оценить давление, создаваемое ножом в отделенной от основного массива части вермикомпоста. Оно будет зависеть от геометрических параметров ножа (угла заострения  $\beta$ , массы  $m_{\text{н}}$ , длины  $l_{\text{н}}$  и высоты  $h_{\text{н}}$ ); физико-механических параметров вермикомпоста (высоты слоя  $\Delta h_{\text{в}}$ , расположенного над ситом; коэффициента Пуассона  $\mu$  и плотности  $\rho_{\text{в}}$ ), а также геометрических параметров сита (его длины  $l_{\text{с}}$ , ширины  $b_{\text{с}}$ , размера ячейки  $a$ ).

Давление  $q$ , найденное по формуле (2.30), после подстановки в условия прочности (2.17) и (2.18) позволяет сделать вывод о возможности прохождения массы вермикомпоста, отсекаемой ножом, через ситовую поверхность, а также о характере сопутствующих деформаций.

Теперь рассмотрим проекцию сил на ось  $x$  (см. рисунок 2.3):

$$F_{\text{д.н.}} \sin\beta + F_{\text{тр}} \cos\beta - R_{\text{м}} = 0. \quad (2.31)$$

Преобразуем выражение (2.31) в неравенство и с учетом формулы (2.8) получим:

$$F_{\text{д.н.}} \leq \frac{\Delta h_{\text{в}} l_{\text{к.н.}} h_{\text{н}} \rho_{\text{в}} g \frac{\mu}{1-\mu}}{\sin\beta + f \cos\beta}. \quad (2.32)$$

При выполнении неравенства (2.32) часть вермикомпоста, отделенная ножом от основного массива, не будет перемещаться в горизонтальном направлении, а только в вертикальном (проходить через сито), что способствует повышению производительности рабочего процесса установки в целом.

## 2.4. Силовой анализ процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора

Особенность процесса выемки заключается в срезании нижнего готового слоя вермикомпоста с его продавливанием через решетчатое основание [109]. Одним из наиболее значимых факторов является усилие для перемещения рабочего органа установки в слое вермикомпоста, которое зависит от ряда параметров. Рабочим органом данной установки является трапецевидный нож.

Основные параметры – физико-механические свойства вермикомпоста и геометрические параметры устройства по выемке готового слоя.

Таким образом, теоретическое обоснование параметров и их влияния на усилие для перемещения ножа в слое с целью снижения энергоемкости устройства для выемки вермикомпоста и повышение его производительности представляют собой актуальную задачу, имеющую хозяйственное значение.

Рассмотрим поступательное движение одностороннего клина в массиве вермикомпоста вдоль решетчатой поверхности (рисунок 2.6). Рабочим органом предлагаемой конструкции является нож.

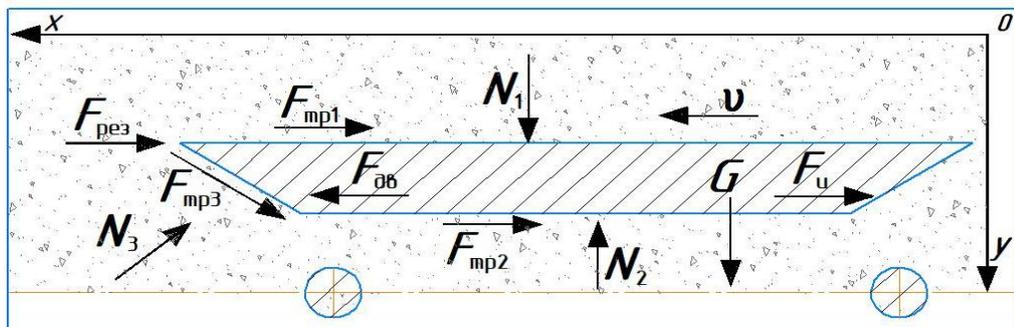


Рисунок 2.6 – Схема сил, действующих на нож установки для отделения готового слоя вермикомпоста от массива

При поступательном движении в слое материала отделение готового слоя вермикомпоста происходит передней кромкой ножа. Затем по ширине захвата на отделяемый слой воздействует грань ножа. Под воздействием режущей кромки происходит полное отделение от основного массива готового слоя вермикомпоста. После отделения части вермикомпоста его частицы движутся по наклонной плоскости ножа и продавливаются через решетчатое основание [59].

Таким образом, в момент отделения готового слоя вермикомпоста возникают следующие силы (см. рисунок 2.6):

$F_{\text{тр1}}$  – сила трения о верхнюю грань ножа, Н;

$F_{\text{тр2}}$  – сила трения о нижнюю грань ножа, Н;

$F_{\text{тр3}}$  – сила трения о кромку ножа, Н;

$N_1$  – реакция верхней поверхности ножа, Н;

$N_2$  – реакция нижней поверхности ножа, Н;

$N_3$  – реакция кромки ножа, Н;

$F_{\text{рез}}$  – сила сопротивления резанию вермикомпоста, Н;

$F_{\text{дв}}$  – движущая сила, Н;

$F_{\text{и}}$  – сила инерции, Н;

$G$  – сила тяжести, Н;

$v$  – скорость движения ножа, м/с.

Теоретически на частицы действует сила инерции  $F_{\text{и}}$ , однако, учитывая движение ножа, вермикомпост в первоначальный момент времени остается фактически неподвижным относительно решета (по оси  $OX$ ). Значение силы инерции в данный момент незначительно, поэтому сила инерции не учитывается.

Тогда нож преодолевает сопротивления только от сил трения и от деформации вермикомпоста.

Уравнения сил по осям  $OX$  и  $OY$ :

- сумма проекций сил, действующих на ось  $OX$ :

$$O_x = -F_{\text{рез}} - F_{\text{тр1}} - F_{\text{тр2}} + F_{\text{дв}} - F_{\text{тр3}} \cos \beta - N_3 \sin \beta; \quad (2.33)$$

- сумма проекций сил, действующих на ось  $OY$ :

$$O_y = -G - N_1 + N_2 - F_{\text{тр3}} \sin \beta + N_3 \cos \beta. \quad (2.34)$$

Из формулы (2.33) можно выразить  $F_{\text{дв}}$  – движущую силу, прикладываемую к ножу и преодолевающую все сопротивления, возникающие в процессе резания. Рассматривая указанное взаимодействие, необходимо учесть геометрические

параметры рабочего устройства, а также физические свойства материала вермикомпоста:

$$F_{\text{дв}} = F_{\text{рез}} + F_{\text{тр1}} + F_{\text{тр2}} + F_{\text{тр3}} \cos \beta + N_3 \sin \beta. \quad (2.35)$$

Рассмотрим силы (сопротивления), возникающие при работе ножа. Отделению материала под воздействием лезвия предшествует процесс предварительного сжатия до возникновения на его кромке разрушающего контактного напряжения  $\sigma_p$  [60].

Силу резания  $F_{\text{рез}}$  определим как произведение площади кромки ножа на разрушающее контактное напряжение [58]:

$$F_{\text{рез}} = S l_n \sigma_p, \quad (2.36)$$

где  $\sigma_p$  – разрушающее контактное напряжение, Па;

$S$  – толщина режущей кромки ножа, м;

$l_n$  – длина ножа, м.

Сила трения на верхней грани ножа  $F_{\text{тр1}}$  препятствует перемещению его в горизонтальной плоскости и зависит от реакции поверхности ножа  $N_1$  и коэффициента трения материала вермикомпоста о его верхнюю плоскость  $f$  [61]:

$$F_{\text{тр1}} = N_1 f, \quad (2.37)$$

где  $f$  – коэффициент трения материала вермикомпоста по стали,  $f = 0,78 \dots 1,14$  (при влажности  $W = 50\text{--}85\%$ ) [51].

Реакция верхней поверхности ножа  $N_1$  прямо пропорционально зависит от массы вермикомпоста  $m_b$ , находящейся над ножом:

$$N_1 = m_b g, \quad (2.38)$$

где  $m_b$  – масса вермикомпоста, находящаяся над ножом, кг;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Масса вермикомпоста  $m_b$  зависит от объема и плотности вермикомпоста  $\rho_b$ , находящегося на верхней грани ножа [62]:

$$m_b = b_n (h_c - h_n) l_n \rho_b, \quad (2.39)$$

где  $b_n$  – ширина ножа, м;

$h_c$  – высота слоя вермикомпоста, м;

$h_n$  – высота ножа, м;

$\rho_b$  – плотность вермикомпоста,  $\rho_b = 485 \dots 860$ , кг/м<sup>3</sup> при влажности  $W = 50\text{--}85\%$  [51].

Сила трения о нижнюю грань ножа  $F_{\text{тр}2}$ :

$$F_{\text{тр}2} = N_2 f. \quad (2.40)$$

Выразим реакцию нижней поверхности ножа  $N_2$  из формулы (2.34):

$$N_2 = G + N_1 + F_{\text{тр}3} \sin \beta - N_3 \cos \beta, \quad (2.41)$$

где  $\beta$  – угол заострения ножа.

На реакцию нижней поверхности ножа  $N_2$  влияют следующие силы: сила тяжести ножа  $G$ , реакция верхней поверхности ножа  $N_1$ , сила трения о верхнюю кромку ножа  $F_{\text{тр}1}$ , реакция кромки ножа  $N_3$ .

Сила тяжести ножа  $G$ :

$$G = m_n g, \quad (2.42)$$

где  $m_n$  – масса ножа, определяемая по формуле:

$$m_n = h_n \left( b_n - \frac{h_n}{\sin \beta} \cos \beta \right) l_n \rho_n, \quad (2.43)$$

где  $\rho_n$  – плотность материала ножа.

Сила трения о кромку ножа  $F_{\text{тр}3}$ :

$$F_{\text{тр}3} = N_3 f. \quad (2.44)$$

При движении ножа в слое вермикомпоста на его кромку действует сила реакции опоры  $N_3$ , которая прямо пропорциональна длине ножа  $l_n$ , высоте ножа  $h_n$ , модулю упругости  $E$  и обратно пропорциональна ширине ножа  $b_n$ .

Выражение, определяющее реакцию кромки ножа  $N_3$ , имеет следующий вид:

$$N_3 = l_n \frac{E}{2b_n} \left( \frac{h_n}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 (\sin^2 \beta + \mu \cos^2 \beta), \quad (2.45)$$

где  $E$  – модуль упругости;

$\mu$  – коэффициент Пуассона, зависящий от физико-механических свойств вермикомпоста.

Для определения результирующего усилия начального движения ножа в слое вермикомпоста подставим итоговые значения в формулу (2.35) и получим следующее выражение:

$$F_{\text{дв}} = Sl_n \sigma_p + gf \left( 2(b_n (h_c - h_n) l_n \rho_b) + h_n \left( b_n - \frac{h_n}{\sin \beta} \cos \beta \right) l_n \rho_n \right) + l_n \frac{E}{2b_n} \left( \frac{h_n}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 (\sin^2 \beta + \mu \cos^2 \beta) (\sin \beta (f^2 + 1)). \quad (2.46)$$

Полученное выражение (2.46) представляет собой силовой анализ взаимодействия рабочих органов с вермикомпостом. Оно связывает усилия взаимодействия с основными параметрами рабочего органа и физико-механическими свойствами вермикомпоста.

## **2.5. Мощность устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора**

Проведенный силовой анализ позволил установить аналитические выражения для мощности, необходимой для выполнения технологического процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

Общая мощность  $P$  (Вт) на выполнение процесса выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора:

$$P = \sum P_0 + P_{\text{д.в.}}, \quad (2.47)$$

где  $P_0$  – мощность перемещения ножа в условии отсутствия нагрузки, Вт;

$P_{дв}$  – мощность перемещения ножа в слое материала, Вт:

$$P_{дв} = F_{дв} v; \quad (2.48)$$

$$P_{дв} = Sl_{н} \sigma_p + gf \left( 2(b_{н} (h_c - h_{н}) l_{н} \rho_B) + h_{н} \left( b_{н} - \frac{h_{н}}{\sin \beta} \cos \beta \right) l_{н} \rho_{н} \right) + \\ + l_{н} \frac{E}{2b_{н}} \left( \frac{h_{н}}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 (\sin^2 \beta + \mu \cos^2 \beta) (\sin \beta (f^2 + 1)) v. \quad (2.49)$$

## 2.6. Производительность устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора

Исходным выражением для расчета производительности устройства, предназначенного для извлечения вермикомпоста из вермиинкубатора, служит формула производительности машин непрерывного действия, выражаемая в килограммах в секунду (кг/с) [11]:

$$Q = \rho A v, \quad (2.50)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$A$  – площадь поперечного сечения потока материала, м<sup>2</sup>;

$v$  – скорость движения потока материала (или машины), м/с.

Производительность устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора  $Q$  (кг/с):

$$Q = \frac{h_{н}}{\sin \beta} l_{н} \rho_B v. \quad (2.51)$$

## 2.7. Энергоемкость устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора

Энергоемкость технологического процесса извлечения вермикомпоста из вермиинкубатора  $\mathcal{E}_e$  (Дж/кг) представляет собой количество энергии, затрачиваемой на выполнение одной или совокупности технологических операций, отнесенное к единице массы получаемого продукта.

Энергоемкость определяется по формуле:

$$\Theta_e = \frac{P}{Q}, \quad (2.52)$$

где  $P$  – общая мощность на выполнение процесса выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора, Вт;

$Q$  – производительность, кг/с.

Энергоемкость процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора:

$$\begin{aligned} \Theta_e = & \left\{ \left[ b l_h \sigma_p + g f \left( 2(b_h (h_c - h_h) l_h \rho_v) + h_h \left( b_h - \frac{h_h}{\sin \beta} \cos \beta \right) l_h \rho_h \right) \right] + \right. \\ & \left. + l_h \frac{E}{2b_h} \left( \frac{h_h}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 (\sin^2 \beta + \mu \cos^2 \beta) (\sin \beta (f^2 + 1)) \right\} v / \\ & / \frac{h_h}{\sin \beta} l_h \rho_v v. \end{aligned} \quad (2.53)$$

## 2.8. Выводы по главе

1. Разработана технологическая схема выемки вермикомпоста из вермиинкубатора, основанная на использовании специализированного технического средства с продольно-движущимся ножом, обеспечивающим отделение готового слоя вермикомпоста через сетчатое дно. Конструкция устройства защищена патентом РФ на полезную модель № 208013 и позволяет значительно снизить трудоемкость ключевой операции – отделение готового слоя вермикомпоста от массива.

2. Получены аналитические выражения, описывающие силовое взаимодействие рабочего органа с вермикомпостом, включая суммарное усилие на его перемещение – формула (2.46), Общая мощность на выполнение процесса (2.49), производительность (2.50) и энергоёмкость процесса (2.51) выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора. Установлено, что усилие и энергозатраты в наибольшей степени зависят от физико-механических свойств вермикомпоста (плотности, влажности, модуля упругости, коэффициента трения),

а также от геометрических параметров ножа: угла заострения  $\beta$ , высоты  $h_n$ , ширины  $b_n$  и длины  $l_n$ .

3. Теоретически обоснован процесс прохождения вермикомпоста через ситовую поверхность, основанный на моделировании нижнего слоя как системы шарнирно опёртых пластин. Получено выражение для критического давления (2.19), при котором материал самопроизвольно проходит через ячейки решета под действием собственного веса, а также условие (2.32), гарантирующее, что отделённый слой не будет смещаться горизонтально, а будет направлен вертикальное смещение, что повышает эффективность процесса выемки вермикомпоста.

4. Установлены ключевые факторы, влияющие на производительность и энергоёмкость: скорость движения ножа  $v$ , высота срезаемого слоя  $h_n$ , плотность вермикомпоста  $\rho_v$  и длина ножа  $l_n$ . Оптимизация этих параметров позволяет снизить удельные энергозатраты и повысить производительность установки.

5. Проведенный теоретический анализ создает научную основу для проектирования рабочего органа, учитывающего специфические свойства вермикомпоста, и позволяет перейти к следующему этапу экспериментальной проверки полученных моделей и оптимизации конструктивно-режимных параметров в лабораторных и производственных условиях.

### 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из поставленных научных и прикладных задач, программа экспериментальных исследований, установки для производства вермикомпоста оснащенной устройством по выемке готового слоя, включала в себя:

- подтверждение работоспособности предлагаемого устройства для выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора;
- определение ключевых физико-механических свойств вермикомпоста;
- проверка достоверности полученных теоретических зависимостей, аналитических выражений и формул, описывающих процесс выемки вермикомпоста из вермиинкубатора;
- получение экспериментальных зависимостей между исследуемыми параметрами и критериями оптимизации;
- обоснование рациональных значений параметров устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора;
- проверка эффективности применения устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

Методика экспериментальных исследований включала в себя:

- разработку и изготовление лабораторного и экспериментально производственного образца установки для производства вермикомпоста с устройством для выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора;
- исследование основных физико-механических свойств вермикомпоста;
- исследование режимных и конструктивных параметров устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора;
- определение оптимальных значений параметров устройства для выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора;
- сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими.

### 3.1. Методика исследования физико-механических свойств вермикомпоста

Вермикомпост представляет собой материал, физико-механические свойства которого существенно варьируются в зависимости от состава исходного субстрата, подвергаемого переработке вермикulturой (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Структура вермикомпоста

Наличие в структуре вермикомпоста не переработанных органических остатков обуславливает неоднородность таких характеристик, как плотность, коэффициент внешнего трения по стали, коэффициент внутреннего трения, а также сопротивление различным видам деформаций: резанию, сжатию, сдвигу и др [48].

В соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями и стандартными методиками определяли физико-механические свойства вермикомпоста. [63, 64, 65, 66].

Влажность вермикомпоста определяли методом высушивания пробы до постоянной массы. Для проведения измерений использовали сушильный шкаф, электронные аналитические весы с точностью взвешивания до 0,001 г и специальный контейнер [65].

Последовательность определения влажности вермикомпоста:

- 1) взвешивание пустого контейнера для получения его массы  $m_1$ ;
- 2) помещение пробы вермикомпоста в контейнер и взвешивание для определения общей массы  $m_2$ ;
- 3) сушка пробы в сушильном шкафу при температуре  $105\text{ }^\circ\text{C}$  до достижения постоянной массы;
- 4) взвешивание контейнера с высушенной пробой вермикомпоста для получения массы  $m_3$ .

Влажность вермикомпоста  $W$  (%) определяли по методологии, разработанной А. П. Герковым [64]:

$$W = \frac{m_2 + m_3}{m_3 + m_1} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где  $m_1$  – масса пустого контейнера, г;

$m_2$  – масса контейнера с влажной пробой, г;

$m_3$  – масса контейнера с высушенной пробой, г.

Плотность вермикомпоста  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) представляет собой отношение массы  $m$  пробы вермикомпоста к его объему  $V$  [64]:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.2)$$

где  $m$  – масса пробы, кг;

$V$  – объем пробы, м<sup>3</sup>.

Массу материала измеряли с использованием мерного контейнера объемом  $0,125\text{ м}^3$  и весов с погрешностью не более  $0,1\%$  [65]. Плотность вермикомпоста, зависящая от его состава, играет ключевую роль процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора. [66].

Угол внутреннего трения  $\varphi$  определяли на специальном приборе (рисунок 3.2), состоящем из неподвижного основания 1, поворотной наклонной плоскости 2, соединенной с основанием шарниром, винтового механизма для плавного изменения угла наклона и угломера 4 для фиксации угла  $\varphi$  [65].

Пробу вермикомпоста 5 помещали на наклонную плоскость и постепенно увеличивали угол наклона до момента начала смещения материала. Значение угла фиксировали с помощью транспортира и отвеса [63, 65].

Коэффициент трения покоя по стали  $f_c$  рассчитывали по формуле:

$$f_c = \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.3)$$

где  $\varphi$  – угол наклона плоскости, при котором начинается движение пробы, град.

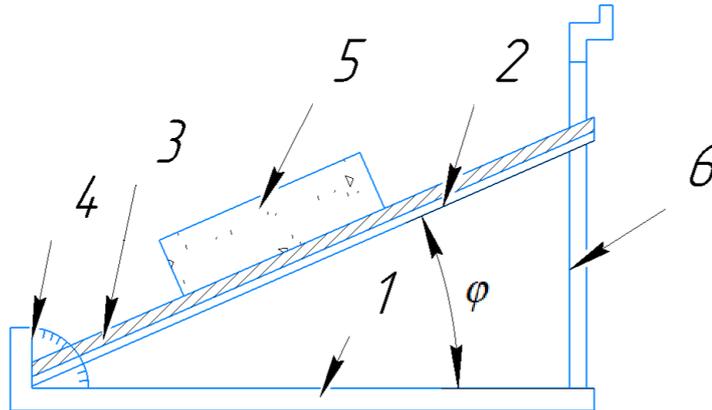


Рисунок 3.2 – Схема прибора для определения угла трения:

- 1 – основание; 2 – поворотная доска; 3 – прикрепляемый к доске материал;  
4 – угломер; 5 – материал; 6 – рычаг

Соппротивление вермикомпоста резанию  $\tau_{\text{рез}}$  определяли на установке, схема которой представлена на рисунке 3.3. Прибор состоит из груза 1, представляющего собой гири массой 0,1 кг, стержня 2, к которому прикреплен наконечник деформатора 3 при помощи резьбового соединения. При установке груза 1 давление через стержень 2 и деформатор 3 передается образцу вермикомпоста 4.

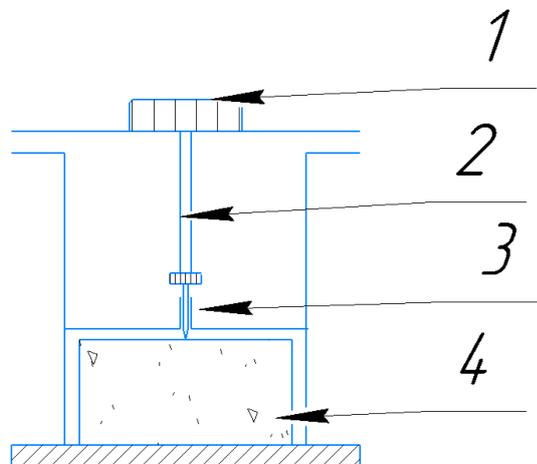


Рисунок 3.3 – Схема прибора для определения сопротивления резанию вермикомпоста:

- 1 – чашка; 2 – стержень; 3 – наконечник деформатор; 4 – образец вермикомпоста

Сопротивление резанию  $\tau_{\text{рез}}$  рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{рез}} = \frac{P}{L}, \quad (3.4)$$

где  $P$  – сила, необходимая при резании деформатором вермикомпоста, Н;  
 $L$  – площадь поперечного сечения деформатора,  $L = 0,2 \text{ мм}^2$ .

Исследования проводились с вермикомпостом влажностью  $W = 70 \%$  и плотностью  $\rho = 680 \text{ кг/м}^3$ .

### 3.2. Описание экспериментальной установки

С целью выполнения экспериментальных исследований и выявления рациональных конструктивных и режимных параметров предлагаемой установки по производству вермикомпоста оснащенной устройством для для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора была разработана экспериментальная установка в соответствии с ранее обоснованными характеристиками.

Вермиинкубатор с техническим средством для извлечения вермикомпоста (рисунок 3.4) содержит секцию, нижнее основание, которое представляет собой сетчатую поверхность с равноудаленными отверстиями.

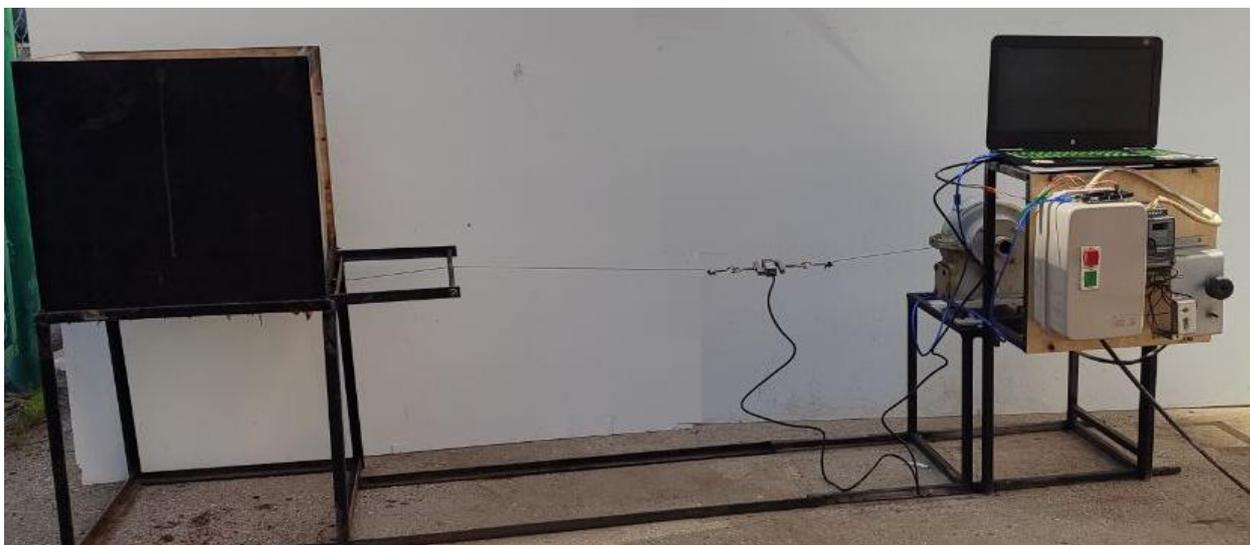


Рисунок 3.4 – Вермиинкубатор и техническое средство для выемки вермикомпоста

Стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами. Кроме того, на нижнем основании установлен нож (рисунок 3.5), выполненный сварным методом из лезвия и установленный в направляющих.



Рисунок 3.5 – Рабочий орган (нож) устройства для извлечения вермикомпоста из вермиинкубатора

Механизм, приводящий в движение нож, представляет собой мотор-редуктор, в который вмонтирован вал со шкивами, натягивающими канат. При этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства (рисунок 3.6). На задней стенке секции закреплена ось с канатами.



Рисунок 3.6 – Механизм привода рабочего органа установки

Для снятия показателей усилия был использован тензодатчик SBA-100L (рисунок 3.7). Он был смонтирован звеном на тросе между креплением ножа и шкивом.



Рисунок 3.7 – Тензодатчик SBA-100L

Технологический процесс в предложенной установке осуществляется следующим образом. В секцию загружают субстрат, состоящий из одной части перепревших опилок, сена или соломы, древесной листвы; одной части органических отходов: полежавшего коровьего навоза или птичьего помета, измельченных овощных очисток, листьев, ботвы и других компонентов. Затем субстрат проходит процесс компостирования в течение нескольких дней, во время которого смесь хорошо прогревают на солнце или добавляют в нее торф с известью. На готовый субстрат выкладывают вермикультуру. Для получения вермикомпоста в помещении, где установлено устройство, поддерживают определенные температуру и влажность субстрата. При готовности вермикомпоста его нижний слой в секции срезается ножом, выполненным сварным методом из лезвия и направляющих, который приводится в движение с помощью мотор-редуктора. В последний вмонтированы вал со шкивом, натягивающим канат, и ось с канатами. При этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства. Далее процесс повторяется. Благодаря такому

устройству механизм эффективно извлекает вермикомпост из вермиинкубатора [44].

### **3.3. Программа и методика экспериментальных исследований установки для производства вермикомпоста**

В результате теоретических исследований были выявлены ключевые факторы, влияющие на эффективность работы устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

К наиболее значимым факторам относятся: геометрические размеры решета нижнего основания, скорость движения ножа в слое вермикомпоста, угол заострения передней кромки ножа, ширина ножа и высота срезаемого слоя вермикомпоста.

В качестве показателей эффективности приняты: сила, необходимая для передвижения ножа в слое материала; мощность привода; производительность и энергоемкость технологического процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

#### *Влияние факторов на эффективность процесса выемки вермикомпоста*

1. Геометрические размеры решета нижнего основания. С увеличением размеров отверстий уменьшается усилие, необходимое для продавливания вермикомпоста через решето, а также увеличивается масса вермикомпоста, просыпавшегося без воздействия ножа, вплоть до полного высыпания установки.

2. Скорость движения ножа. Высокая скорость увеличивает производительность установки по производству вермикомпоста, а усилие, необходимое для движения ножа в слое материала, сначала немного уменьшается, а затем стремительно возрастает. Оптимальная скорость движения ножа в слое материала позволяет достичь баланса между производительностью и усилием, необходимым для осуществления процесса выемки.

3. Угол заострения передней кромки ножа. Помимо прочностных свойств при выборе угла заострения ножа необходимо учитывать ряд факторов. С уменьшением угла заострения уменьшается усилие, необходимое для внедрения в материал, но

увеличивается площадь соприкосновения лезвия ножа с материалом, что в значительной части увеличивает силу трения, возникающую при работе.

4. Ширина ножа. С увеличением ширины ножа увеличивается площадь контакта с вермикомпостом, что негативно сказывается на усилиях, необходимом для передвижения ножа в слое материала. Минимальная ширина ножа негативно сказывается на его прочностных показателях.

5. Высота срезаемого слоя. С увлечением высоты срезаемого слоя повышается производительность устройства, но также растет усилие, которое необходимо для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора. Помимо этого, увеличение высоты срезаемого слоя вермикомпоста негативно сказывается на травмируемости вермикультуры в момент его обрушения. Имеет место также чрезмерное просыпание органического удобрения сквозь решето.

Показатели эффективности процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора:

- усилие движения в слое материала, характеризующее сопротивление, которое необходимо преодолеть для разделения и проталкивания вермикомпоста в процессе его выемки из вермиинкубатора;
- мощность привода, напрямую влияющая на энергопотребление и эксплуатационные затраты оборудования;
- производительность, определяемая объёмом материала, извлеченного за единицу времени; является решающим фактором при организации промышленного производства;
- энергоёмкость, отражающая удельные энергозатраты на единицу продукции; служит важным критерием экономической целесообразности и рентабельности применения установки для выемки вермикомпоста.

Оптимизация указанных факторов способствует повышению эффективности работы устройства для извлечения вермикомпоста из вермиинкубатора, упрощению технологической операции выемки и снижению эксплуатационных затрат. Исследование данных факторов и связанных с ними критериев оптимизации проводилось в рамках утверждённой программы экспериментальных работ, включающей в себя серию экспериментов.

Для определения оптимальных размеров решета нижнего основания был разработан план эксперимента (таблица 3.1) по оценке просыпания вермикомпоста через нижнее основание, представленное сетчатой поверхностью, и разработана лабораторная установка, с помощью которой осуществлялось данное исследование.

В эксперименте изучали влияние геометрических параметров решета нижнего основания на количество просыпанного материала (%) в момент загрузки и после нее. Для выполнения этого эксперимента были разработаны, а затем изготовлены различные решета нижнего основания (рисунок 3.8).

Таблица 3.1 – План эксперимента по определению просыпания вермикомпоста

Показатель	Размер ячейки нижнего основания, мм					
	150	125	100	75	50	25
№ 1 Масса просыпаемого материала	$m_1$ кг	$m_1$ кг	$m_1$ кг	$m_1$ кг	$m_1$ кг	$m_1$ кг
№ 2 Масса просыпаемого материала	$m_2$ кг	$m_2$ кг	$m_2$ кг	$m_2$ кг	$m_2$ кг	$m_2$ кг
№ 3 Масса просыпаемого материала	$m_3$ кг	$m_3$ кг	$m_3$ кг	$m_3$ кг	$m_3$ кг	$m_3$ кг

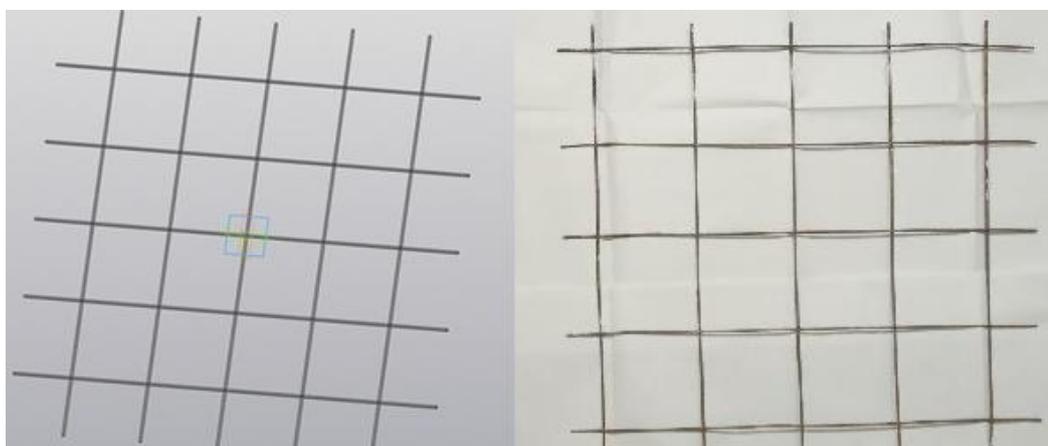


Рисунок 3.8 – Решето нижнего основания 100×100 мм

Для определения оптимальных режимных параметров устройства, предназначенного для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора, был разработан симметричный двухфакторный план эксперимента (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – План двухфакторного эксперимента для исследования критериев оптимизации режимных параметров устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора

Симметричный двухфакторный план эксперимента								
№	уровень фактора				критерии оптимизации			
	поступательная скорость (фактор $A$ )		высота снимаемого слоя (фактор $B$ )		производительность	движущая сила	мощность	энергоёмкость
	№	м/с	№	мм				
1	1	0,1	1	5	$Q$	$F_{дв}$	$P$	$\mathcal{E}_{e1}$
2	2	0,2	2	10	$Q$	$F_{дв}$	$P$	$\mathcal{E}_{e2}$
3	3	0,3	3	15	$Q$	$F_{дв}$	$P$	$\mathcal{E}_{e3}$

Исследования проводили на специально созданной лабораторной установке, воспроизводящей основные рабочие процессы промышленного аналога.

В ходе эксперимента изучали влияние двух варьируемых параметров на показатели эффективности: поступательной скорости рабочего органа и высоты снимаемого слоя вермикомпоста. Эти факторы были выбраны как ключевые режимные характеристики, от которых зависят энергоёмкость процесса, производительность и мощность установки. Целью эксперимента стало выявление таких сочетаний параметров, при которых достигаются наилучшие технологические и экономические показатели работы устройства.

Фактор  $A$  – поступательная скорость, ее варьировали от 0,1 до 0,3 м/с. Значения скорости задавали путем регулирования частоты вращения электродвигателя с использованием частотного преобразователя.

Фактор  $B$  – высота снимаемого слоя, ее изменяли от 5 до 15 мм. Для этого были изготовлены сменные ножи соответствующей ширины.

В качестве критериев оптимизации для двухфакторного эксперимента по определению режимных параметров установки для производства вермикомпоста использовали следующие показатели: движущая сила  $F_{дв}$  (Н), общая мощность на

выполнение процесса выемки готового слоя  $P$  (Вт), производительность  $Q$  (кг/с) и энергоёмкость  $\mathcal{E}_e$  (Дж/кг).

Для оптимизации геометрических параметров рабочего органа был составлен план трехфакторного эксперимента. В соответствии с ним разработаны факторы, уровни факторов и интервалы их варьирования, которые представлены в таблице 3.3. Первый фактор  $h_n$  – ширина ножа (м), имел кодовое обозначение  $X_1$  и изменялся от 5 мм до 15 мм, интервал варьирования 5 мм. Второй фактор  $l_n$  – длина ножа (м), кодовое обозначение  $X_2$ , изменялся от 7 см до 11 см, интервал варьирования 2 см. Третий фактор  $\beta$  – угол заострения ножа (град.), кодовое обозначение  $X_3$ , изменялся от 25 до 45 град., интервал варьирования 10 град. За главный критерий оптимизации был выбран показатель движущей силы  $F_{дв}$  (Н).

Таблица 3.3 – Факторы, уровни факторов и интервалы варьирования

Фактор	Кодовое обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
$h_n$ – ширина ножа, м	$X_1$	0,005	0,01	0,015	0,005
$l_n$ – длина ножа, м	$X_2$	0,07	0,09	0,11	0,02
$\beta$ – угол заострения ножа, град.	$X_3$	25	35	45	10

В дальнейшем был составлен некомпозиционный план трехфакторного эксперимента Бокса – Бенкена (таблица 3.4). Исследования проводили на лабораторной установке для определения усилия выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

Для регулирования данных факторов в ходе эксперимента были изготовлены ножи с заданными параметрами (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Ножи устройства для выемки  
вермикомпоста из вермиинкубатора

Таблица 3.4 – Некомпозиционный план трехфакторного эксперимента Бокса – Бенкена  
для определения оптимальных геометрических параметров устройства  
для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$F_{дв}$
1	1	1	0	$F_{дв}$
2	-1	-1	0	$F_{дв}$
3	1	-1	0	$F_{дв}$
4	-1	1	0	$F_{дв}$
5	1	0	1	$F_{дв}$
6	-1	0	-1	$F_{дв}$
7	1	0	-1	$F_{дв}$
8	-1	0	1	$F_{дв}$
9	0	1	1	$F_{дв}$
10	0	-1	-1	$F_{дв}$
11	0	1	-1	$F_{дв}$
12	0	-1	1	$F_{дв}$
13	0	0	0	$F_{дв}$
14	0	0	0	$F_{дв}$
15	0	0	0	$F_{дв}$

«Представленная методология обеспечивает возможность точного математического описания выбранного критерия оптимизации с использованием полиномиального выражения второго порядка [67, 68]:

$$y = b_0 + \sum^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum^k b_{ii} x_j^2, \quad (3.5)$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты регрессии;  
 $k$  – число факторов.

Основной целью проведения экспериментального исследования являлось установление коэффициентов полиномиальной модели. Проверка гомогенности и стабильности экспериментальных результатов осуществлялась с применением критерия Кохрена [67, 68]:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{yu \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_{yu}^2}, \quad (3.6)$$

где  $S_{yu \max}^2$  – наибольшая построчная дисперсия;

$\sum_{u=1}^N S_{yu}^2$  – сумма построчных дисперсий.

Показатели разброса значений отклика  $S_{yu}^2$  [69]:

$$S_{yu}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{ug} - \bar{y}_g)^2}{N f_u}, \quad (3.7)$$

где  $y_{ug}$  – результат  $g$ -го повторения  $u$ -го опыта;

$\bar{y}_g$  – среднее значение критерия оптимизации всех повторений  $u$ -го опыта;

$f_u$  – число степеней свободы при определении  $u$ -й построчной дисперсии  $S_{yu}^2$ :

$$f_u = n_u - 1,$$

где  $n_u$  – число повторов  $u$ -го опыта.

При условии, что расчетное значение критерия  $G_{\text{расч}}$ , определенное по формуле (3.6), будет меньше критического значения  $G_{\text{кр}}$ , найденного в справочных таблицах в зависимости от уровня значимости  $\alpha$ , числа степеней свободы  $f_u = n_u - 1$ , и количества экспериментов  $N$ , нами была принята гипотеза о гомогенности дисперсии и воспроизводимости результатов [67, 69].

По результатам экспериментальных исследований была сформирована полиномиальная модель второго порядка (3.5). Ее коэффициенты определяли по формулам [91]:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \bar{y}_0; \\
 b_i &= A \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u; \\
 b_{ij} &= D \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u; \\
 b_{ii} &= B \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_1 \sum_j^{n_1} \sum_{u=1}^N x_{ju}^2 y_u + C_2 \sum_l^{n_2} \sum_{u=1}^N x_{lu}^2 y_u - \left( \frac{\bar{y}_0}{\rho} \right),
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

где  $\bar{y}_0$  – среднее значение отклика в нулевых точках;

$\sum_j^{n_1}$  и  $\sum_l^{n_2}$  – суммирование для столбцов плана, соответствующих элементам  $j, l$ ,

первично и вторично связанным с  $i$ -м элементом в схеме построения плана;

$x_{iu}, x_{ju}$  – кодированные значения двух факторов в  $u$ -м опыте;

$y_u$  – значение критерия оптимизации в  $u$ -м опыте;

$N$  – число опытов в матрице планирования;

$A, B, C, D, \rho$  – константы, зависящие от числа факторов.

Значения констант в формулах для расчета коэффициентов регрессии при количестве факторов, равном 3, составляют [67, 70]:

$$A = 1/8; \quad B = 1/4; \quad C_1 = -1/16; \quad C_2 = 0; \quad D = 1/4; \quad \rho = 2.$$

Дисперсии, характеризующие погрешности в определении коэффициентов уравнения регрессии, рассчитывали по формулам [69]:

$$\begin{aligned}
 S_{b_0}^2 &= \frac{1}{n_0} S_y^2; \\
 S_{b_i}^2 &= A S_y^2; \\
 S_{b_{ij}}^2 &= D S_y^2; \\
 S_{b_{ii}}^2 &= \left[ B + \frac{1}{\rho^2 n_0} \right] S_y^2,
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

где  $S_y^2$  – дисперсия воспроизводимости эксперимента, определяемая по результатам опытов в центре плана [69]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_{u_0} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}, \quad (3.10)$$

где  $y_{u_0}$  – значение критерия оптимизации в  $i$ -м опыте центра плана;

$n_0$  – число опытов в центре плана.

После определения коэффициентов проводили проверку их статистической значимости по критерию Стьюдента с использованием доверительных интервалов оценок коэффициентов, которые рассчитывали по формулам [67]:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm t S_{b_0}; \\ \Delta b_i &= \pm t S_{b_i}; \\ \Delta b_{ij} &= \pm t S_{b_{ij}}; \\ \Delta b_{ii} &= \pm t S_{b_{ii}}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где  $t$  – критерий Стьюдента, берется из таблиц [67] в зависимости от уровня значимости  $\alpha$ , числа степеней свободы  $f_u = n_u - 1$  при определении дисперсии опыта.

Коэффициент признается статистически значимым при выполнении условия: абсолютная величина коэффициента превышает доверительный интервал, т. е.  $|b_i| > \Delta b_i$ . Сущность данного неравенства заключается в том, что абсолютная величина коэффициента должна превышать погрешность его определения в  $t$  раз [67].

Соответствие полученной математической модели экспериментальным данным проверялось с использованием критерия Фишера. Его расчетное  $F_{\text{расч}}$  значение [67]:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2}, \quad (3.12)$$

где  $S_{\text{неад}}^2$  – дисперсия неадекватности:

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{S_R - S_E}{N - k^1 - (n_0 - 1)}, \quad (3.13)$$

где  $k^1$  – количество коэффициентов регрессии;

$S_R$  – сумма квадратов отклонений расчетных значений от экспериментальных во всех точках плана [69]:

$$S_R = \sum^N (y_u - \bar{y}_u)^2, \quad (3.14)$$

где  $S_E$  – сумма квадратов, связанная с дисперсией, определяемой по результатам опыта в центре эксперимента [67]:

$$S_E = \sum^{n_0} (y_{u_0} - \bar{y}_0)^2. \quad (3.15)$$

Физический смысл  $F$ -критерия заключается в проверке адекватности математической модели экспериментальным данным. Гипотеза о том, что модель корректно описывает исследуемый процесс, принимается в том случае, если расчётное значение  $F$ -критерия не превышает критического табличного значения при заданном уровне значимости, т. е. при выполнении условия  $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$  [69].

При реализации плана эксперимента и вычислении коэффициентов регрессии по формулам (3.8) уравнение (3.5) приняло кодированную форму, в которой факторы выражены в безразмерных нормированных единицах.

Для практического использования уравнения (3.5) в качестве расчётной зависимости и корректной интерпретации результатов эксперимента выполнили обратный переход: преобразовали коэффициенты регрессии из кодированной формы в физические величины. Эта процедура, называемая раскодированием, позволяет выразить модель через реальные значения технологических параметров.

Раскодирование выполнялось по методикам [92]:

- при преобразовании линейных членов уравнения:

$$b_{i,x_i} = \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_i - \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_{oi}; \quad (3.16)$$

- при преобразовании членов уравнения, содержащих взаимодействия:

$$b_{ij}x_ix_j = \frac{b_{ij}}{\varepsilon_i\varepsilon_j}(X_iX_j - X_iX_{0j} - X_jX_{0i} + X_{0i}X_{0j}); \quad (3.17)$$

- при преобразовании квадратичных членов уравнения:

$$b_{ii}x_i^2 = \frac{b_{ii}}{\varepsilon_i^2}(X_i^2 - 2X_iX_{0i} + X_{0i}^2), \quad (3.18)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора (безразмерная величина);

$X_i$  – натуральное значение фактора;

$X_{0i}$  – натуральное значение фактора на нулевом уровне;

$\varepsilon$  – натуральное значение интервала варьирования фактора:

$$\varepsilon = \frac{X_i^B - X_i^H}{2}, \quad (3.19)$$

где  $X_i^B$  – значение фактора на верхнем уровне;

$X_i^H$  – значение фактора на нижнем уровне.

Уравнение регрессии (3.5), полученное в результате обработки данных трёхфакторного эксперимента, обладает сложной структурой, что затрудняет его анализ и визуализацию в трёхмерном факторном пространстве. С целью упрощения интерпретации и построения наглядных графических зависимостей было выполнено каноническое преобразование уравнения. Это преобразование включает в себя смещение начала координат в новую точку  $S$ , обычно в стационарную точку поверхности отклика, и поворот координатных осей на определённые углы, соответствующие собственным векторам матрицы квадратичной формы. В результате проведённого преобразования линейные члены в уравнении исчезли, а свободный член принял новое значение, отражающее отклик в новом начале координат [92].

Уравнение регрессии в канонической форме имеет вид:

$$Y - Y_S = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{kk}X_k^2, \quad (3.20)$$

где  $Y$  – значение критерия оптимизации;

$Y_s$  – значение критерия оптимизации в критической точке;

$X_1, X_2, \dots, X_k$  – новые оси координат, повернутые относительно старых осей  $x_1, x_2, \dots, x_k$ ;

$B_{11}, B_{22}, \dots, B_{kk}$  – коэффициенты регрессии в канонической форме» [92].

Путём подстановки различных фиксированных значений оптимизируемого параметра в уравнение (3.20) были получены уравнения соответствующих контурных линий, в данном случае – эллипсов и минимаксных кривых. Совокупность этих линий, представленная в графической форме поверхности отклика, позволила визуализировать характер зависимости отклика от варьируемых факторов».

### 3.4. Последовательность проведения опытов

Опыты проводили в следующей последовательности.

Для однофакторного эксперимента – исследование просыпания:

1. Подготовка лабораторной установки (рисунок 3.10) к работе.
2. Подготовка вермикомпоста: доведение его до необходимой влажности.
3. Загрузка вермикомпоста в бункер.
4. Снятие щита заглушки с нижнего основания.
5. Имитация рабочего процесса.
6. Взвешивание материала, полученного в ходе эксперимента.
7. Определение критериев оптимизации.
8. Заполнение журнала эксперимента.
9. Обработка результатов эксперимента.



Рисунок 3.10 – Проведение экспериментальных исследований  
просыпания вермикомпоста

Для двухфакторного эксперимента – определение режимных параметров:

1. Подготовка лабораторной установки (рисунок 3.11) к работе, установка ножа и датчиков системы.
2. Подготовка вермикомпоста: доведение его до необходимой влажности.
3. Загрузка вермикомпоста в бункер.
4. Включение программы для считывания данных.
5. Включение электродвигателя, который обеспечивает равномерное движение ножа с выбранной скоростью.
6. Выполнение рабочего процесса с замером времени.
7. Остановка работы устройства.
8. Взвешивание материала, полученного в ходе эксперимента.
9. Определение критериев оптимизации.
10. Заполнение журнала эксперимента.
11. Обработка результатов эксперимента.



Рисунок 3.11 – Проведение экспериментальных исследований процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора

Для трехфакторного эксперимента – определение геометрических параметров ножа устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора:

1. Подготовка лабораторной установки к работе, установка ножа и датчиков системы.
2. Подготовка вермикомпоста: доведение его до необходимой влажности.
3. Загрузка вермикомпоста в бункер.
4. Включение программы для считывания данных.
5. Включение электродвигателя, который обеспечивает равномерное движение ножа с выбранной скоростью.
6. Выполнение рабочего процесса с замером времени.
7. Остановка работы устройства.
8. Определение критериев оптимизации.
9. Заполнение журнала эксперимента.
10. Обработка результатов эксперимента.

По полученным данным определяли технико-экономические показатели предлагаемого устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

Для замера показателей и фиксации результатов опытов было использовано следующее оборудование:

- тензодатчик SBA-100L для регистрации усилия, возникающего при движении ножа в слое материала;
- весы и датчики влажности для определения влажности и массы субстрата.

Тарировку тензометрической аппаратуры производилась до и после проведения испытаний.

### **3.5. Выводы по главе**

1. Разработан и изготовлен опытный образец установки для производства вермикомпоста оснащённый устройством для выемки готового слоя.
2. Разработаны программа и методика исследования устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.
3. Определена методика исследования физико-механических свойств вермикомпоста.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения эффективности работы установки по производству вермикомпоста проводили экспериментальные исследования: определяли оптимальные геометрические параметры решет нижнего основания, а также режимные и геометрические параметры устройства по выемке вермикомпоста. Получены экспериментальные зависимости между критериями оптимизации и исследуемыми факторами в результате работы срезающего устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора.

Процесс выемки вермикомпоста из вермиинкубатора является важной составляющей технологического процесса производства вермикомпоста. От его эффективности зависят качество конечного продукта и экономическая целесообразность всего производства. Готовый вермикомпост представляет собой однородный материал, состоящий из переработанных органических компонентов и продуктов жизнедеятельности вермикультуры.

Для выполнения операции выемки разработано специализированное устройство срезающего типа с канатным приводом и регулируемым ножом, конструкция и работа установки по производству вермикомпоста описаны в патенте на полезную модель (№208013). На рисунке 4.1 показано проведение экспериментальных исследований.



Рисунок 4.1 – Проведение экспериментальных исследований по определению режимных и геометрических параметров устройства по выемке

Основным рабочим органом устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора является регулируемый нож с лезвием, перемещающийся по

направляющим над сетчатым основанием секции. Корпус устройства содержит бункер – замкнутое пространство, где происходит вермикомпостирование, нижним основанием служит сетчатая поверхность, обеспечивающая сепарацию готового продукта.

Важную роль в процессе извлечения вермикомпоста играют геометрические характеристики рабочего органа устройства: ширина и длина ножа, а также угол его заострения. Оптимальный подбор этих параметров способствует повышению качества и производительности процесса, снижая при этом затраты энергии и увеличивая ресурс режущей кромки.

Таким образом, для обеспечения эффективного и качественного процесса выемки необходимо комплексно учитывать, как кинематические характеристики, так и геометрические особенности режущих элементов применяемого оборудования.

#### 4.1. Результаты исследований физико-механических свойств вермикомпоста

Для обоснования конструктивных и режимных параметров, устройства по выемке вермикомпоста из вермиинкубатора, были проведены исследования физико-механических свойств вермикомпоста, выполненных в соответствии с методикой, изложенной в третьей главе, были установлены ключевые параметры данного органического удобрения при соблюдении оптимального уровня влажности. Так как в зависимости от влажности  $W$  изменяются другие параметры вермикомпоста, а именно коэффициент трения движения по стали  $f_d$ , коэффициент трения скольжения  $f_c$ , коэффициент внутреннего трения  $f_v$ , плотность  $\rho$ , липкость  $\sigma$ ; угол трения  $\varphi$  (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Результаты исследований физико-механических свойств вермикомпоста

Параметр	Значение
Влажность $W$ , %	70
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	680
Липкость $\sigma$ , Н/м <sup>2</sup>	6,75
Угол трения $\varphi$ , град.	51
Коэффициент трения скольжения $f_c$	1,2
Коэффициент трения движения по стали $f_d$	1,1
Коэффициент внутреннего трения $f_v$	1,2

## 4.2. Результаты исследования процесса просыпания вермикомпоста

Результаты исследований процесса просыпания вермикомпоста через решето нижнего основания вермиинкубатора имеют большое значение при оптимизации процесса выемки. Важно понимать, как параметры решета влияют на процесс выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора.

Одним из основных параметров, рассматриваемых в исследованиях, является размер ячейки решета нижнего основания. Он варьируется в зависимости от фазы процесса выемки готового вермикомпоста или подкормки. Исследования показывают, что слишком малый размер ячейки приводит к забиванию решета и увеличению усилия выемки, а слишком большой – к неконтролируемому просыпанию материала и вермикультуры.

Важным аспектом изучения процесса вермикомпостирования является анализ зависимости количества просыпанного материала (%) от размера ячейки (рисунок 4.2). Эксперимент позволил удостовериться, что оптимальный размер ячейки способствует формированию нужного баланса между полной выемкой и предотвращением потерь. Слишком большой или слишком малый размер может привести к нарушениям технологического процесса. Правильно подобранная величина ячеек играет важную роль в технологическом процессе, позволяя оптимизировать процесс отделения биомассы и повысить эффективность эксплуатации оборудования для вермикомпостирования.

В результате исследований процесса просыпания были получены уравнения регрессии, отражающие данную зависимость. Уравнения регрессии, описывающие влияние размера ячейки решета на количество просыпанного материала (%) в процессах выемки и подкормки, имеют следующий вид:

- процесс выемки:

$$Y = 1,3829d^2 - 6,2081d + 6,2836; \quad (4.1)$$

- процесс подкормки:

$$Y = 1,4952d^2 - 8,2683d + 8,9639. \quad (4.2)$$



Рисунок 4.2 – Неконтролируемый процесс просыпания материала

Графически зависимость количества просыпанного вермикомпоста  $Y$  (%) от размера ячейки решета  $d$  представлена на рисунке 4.3.

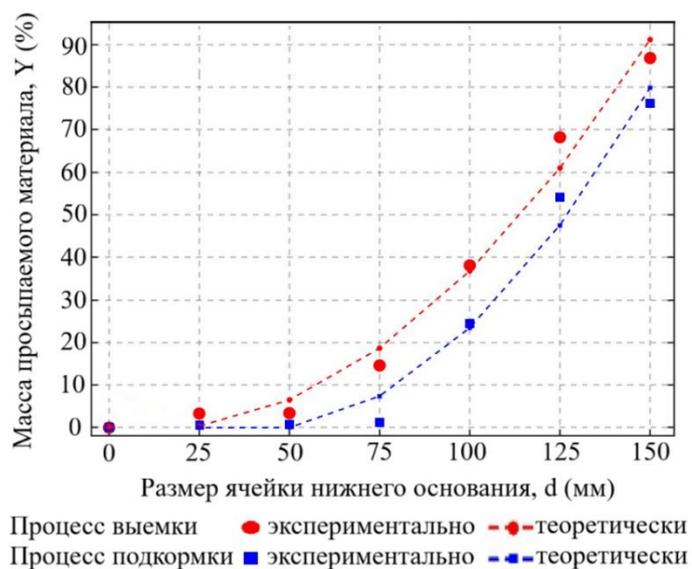


Рисунок 4.3 – Зависимость количества массы просыпанного вермикомпоста  $Y$  (%) от размера ячейки решета нижнего основания  $d$  (мм) в процессах выемки (А) и подкормки (Б)

Анализ полученных вероятностно-статистических моделей и их графического представления свидетельствует о закономерности. Так, с увеличением размера

ячеек решета количество просыпанного материала возрастает как в обоих исследуемых процессах.

Анализ показал линейный характер зависимости по исследуемому параметру размера ячейки решета с высокими коэффициентами детерминации ( $R^2 = 0,98$  для выемки,  $R^2 = 0,972$  для подкормки). При этом для процесса выемки просыпание при одинаковом размере ячейки решета выше, чем для процесса подкормки.

Оптимальные размеры ячейки решета  $50 \times 50$  мм. При этом просыпание при выемке обеспечивает эффективное отделение готового продукта, а при подкормке минимизирует неконтролируемые потери.

### **4.3. Результаты экспериментальных исследований режимных параметров рабочего процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора**

В исследовании применяли двухфакторный эксперимент, целью которого являлось изучение влияния скорости движения ножа  $V$  и высоты срезаемого слоя  $h$  на ключевые технологические показатели процесса выемки вермикомпоста. Анализировали зависимости таких параметров, как движущая сила  $F_{дв}$ , мощность привода  $P_{дв}$ , производительность  $Q$  и энергоемкость  $\mathcal{E}_e$  процесса от выбранных факторов. Выбор именно этих параметров обусловлен предварительными теоретическими исследованиями, подтверждающими их прямое влияние на эффективность и экономичность выемки вермикомпоста.

Указанные параметры выступали в качестве определяющих факторов, оказывающих существенное влияние на конечные результаты процесса выемки вермикомпоста, и были приняты в качестве основных критериев оптимизации.

#### **4.3.1. Влияние скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя на движущую силу**

В ходе исследований влияния скорости движения ножа  $V$  и высоты срезаемого слоя  $h$  на движущую силу  $F_{дв}$  была проведена серия экспериментов.

Скорость движения ножа  $V$  является важным параметром, определяющим динамику процесса выемки, а также усилие, необходимое для перемещения ножа в

слое материала. В экспериментах изменяли значения скорости  $V$  с целью определения оптимального значения, при котором достигается минимальное или рациональное усилие  $F_{\text{дв}}$ . Также изучали влияние высоты слоя  $h$  на усилие.

Исследования влияния на движущую силу  $F_{\text{дв}}$  скорости движения ножа  $V$  и высоты срезаемого слоя  $h$  позволили получить уравнения, описывающие полученные результаты.

Проведённый анализ позволил установить устойчивую взаимосвязь между параметрами скорости движения ножа  $V$  и высоты срезаемого слоя  $h$  на движущую силу, что имеет принципиальное значение для оптимизации технологического процесса выемки вермикомпоста из верминкубатора. На основе выявленной зависимости была разработана регрессионная модель, количественно описывающая характер влияния факторов на движущую силу.

Уравнение регрессии, описывающее влияние скорости движения ножа  $V$  и высоты слоя  $h$  на движущую силу  $F_{\text{дв}}$ :

$$F_{\text{дв}} = 256,85 + 8982,67h + 73,33V - 250V^2. \quad (4.3)$$

Графически зависимость движущей силы  $F_{\text{дв}}$  от скорости движения ножа  $V$  и высоты слоя  $h$  представлена на рисунке 4.4. Комплексные исследования вероятностно-статистической модели и ее визуализации свидетельствует о том, что усилие имеет сложную зависимость от скорости и высоты слоя. Эксперименты показали, что с увеличением высоты слоя  $h$  увеличивается движущая сила  $F_{\text{дв}}$ .

Влияние высоты слоя на усилие носит линейный характер. При этом усилие  $F_{\text{дв}}$  параболически зависит от скорости  $V$  с максимумом при  $V \approx 0,4$  м/с. При  $h = 0,005$  м увеличение скорости с 0,01 до 0,3 м/с приводит к уменьшению движущей силы  $F_{\text{дв}}$  с 280 до 255 Н, с увеличением скорости с 0,3 до 0,4 м/с усилие возрастает с 255 до 259 Н. В то же время при высоте слоя  $h = 0,015$  м увеличение скорости с 0,01 до 0,3 м/с приводит к уменьшению усилия с 370 до 350 Н, а при увеличении скорости с 0,3 до

0,4 м/с усилие возрастает с 350 до 357 Н. Подтверждена нелинейная зависимость по скорости, адекватно описываемая квадратичную зависимостью.

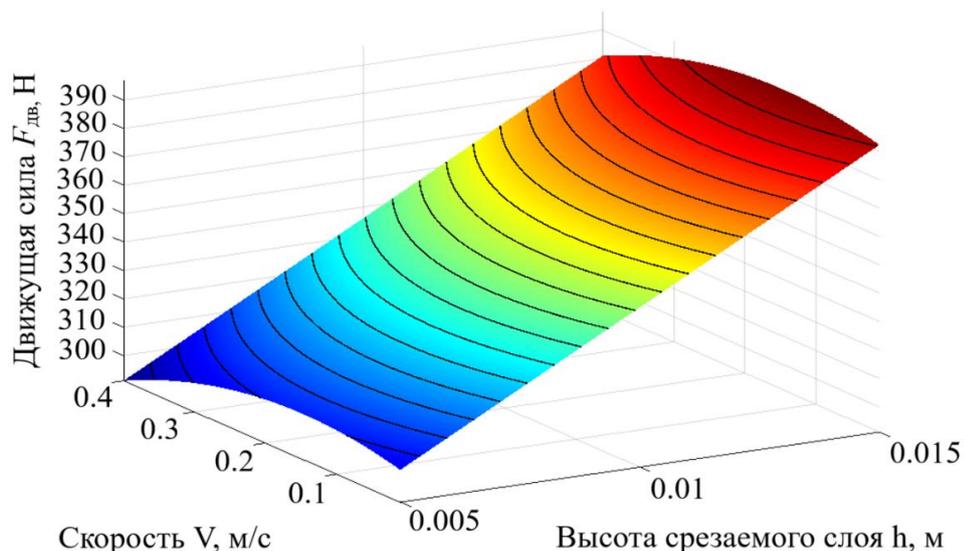


Рисунок 4.4 – Экспериментальная зависимость движущей силы  $F_{дв}$  (Н) от скорости движения ножа  $V$  (м/с) и высоты срезаемого слоя  $h$  (м)

Изменение движущей силы  $F_{дв}$  в зависимости от скорости движения ножа  $V$  обусловлено характером трения между рабочим органом и материалом. При малых скоростях движения ножа преобладает трение, близкое к трению покоя, коэффициент которого выше, чем коэффициент трения скольжения, проявляющегося при больших скоростях. Вследствие этого движущая сила при низких скоростях оказывается выше.

Изменение движущей силы  $F_{дв}$  в зависимости от высоты срезаемого слоя вермикомпоста  $h$  обуславливает характер изменения усилия, связанного с увеличением объёма извлекаемого материала: чем толще слой, тем больше масса и площадь контакта, а значит, пропорционально возрастает сила сопротивления внедрению и перемещению ножа.

#### 4.3.2. Влияние на мощность привода скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя вермикомпоста

Исследования влияния скорости движения ножа  $V$  и высоты срезаемого слоя  $h$  на общую мощность на выполнение процесса выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора  $P_{дв}$  позволили получить уравнение:

$$P = 1010,24Vh^{0,25}. \quad (4.4)$$

Анализ графиков (рисунок 4.5), полученных по уравнению регрессии (4.4), показал, что мощность линейно зависит от скорости  $V$  и в меньшей степени зависит от высоты слоя  $h$ . Так, при  $h = 0,005$  м увеличение скорости с 0,01 до 0,4 м/с приводит к повышению мощности с 2,8 до 103 Вт. В то же время при постоянной скорости  $V = 0,2$  м/с увеличение высоты слоя с 0,005 до 0,015 м приводит к росту мощности с 51 до 70 Вт. Зависимость адекватно описывается степенной функцией.

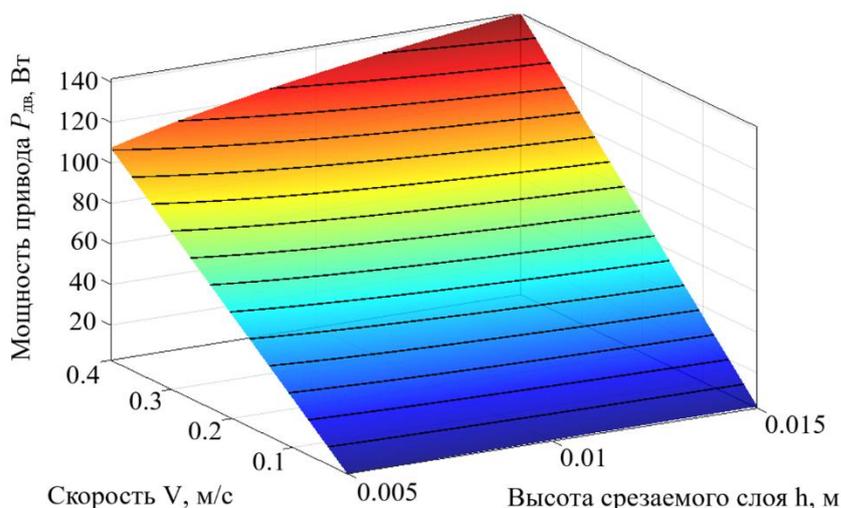


Рисунок 4.5 – Экспериментальная зависимость мощности привода  $P_{\text{дв}}$  (Вт) от скорости движения ножа  $V$  (м/с) и высоты срезаемого слоя  $h$  (м)

Общая мощность на выполнение процесса выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора устройства линейно возрастает с увеличением скорости движения ножа  $V$  и слабо зависит от высоты срезаемого слоя  $h$ . Данная зависимость физически обусловлена тем, что основная доля мощности расходуется на преодоление сил трения и инерции при перемещении ножа, что прямо пропорционально скорости его движения. Увеличение объема срезаемого материала оказывает меньшее влияние на общее энергопотребление.

#### 4.3.3. Влияние скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя на производительность устройства для выемки вермикомпоста

Исследования влияния на производительность  $Q$  скорости движения ножа  $V$  и высоты срезаемого слоя  $h$  позволили получить уравнение:

$$Q = 698,529hV. \quad (4.5)$$

Анализ показал, что производительность пропорциональна как скорости  $V$ , так и высоте слоя  $h$  (рисунок 4.6). Так, при высоте слоя  $h = 0,015$  м увеличение скорости с 0,01 до 0,4 м/с привело к росту производительности с 0,1 до 4,1 кг/с. При  $V = 0,3$  м/с увеличение высоты слоя с 0,005 до 0,015 м привело к повышению производительности с 1,0 до 3,1 кг/с.

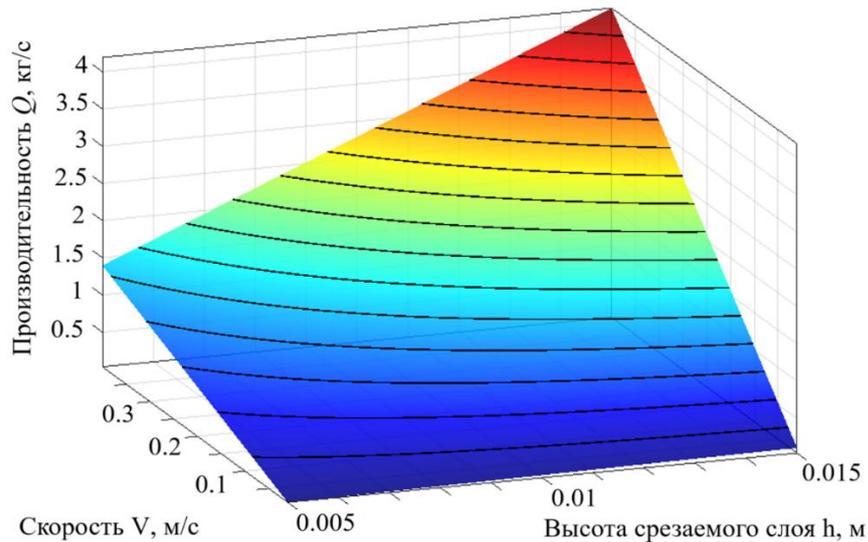


Рисунок 4.6 – Экспериментальная зависимость производительности  $Q$  (кг/с) от скорости движения ножа  $V$  (м/с) и высоты срезаемого слоя  $h$  (м)

Таким образом, производительность устройства для извлечения вермикомпоста прямо пропорциональна скорости перемещения ножа  $V$  и высоте срезаемого слоя  $h$ . Данная зависимость физически обусловлена тем, что производительность определяется объемом материала, извлекаемого за единицу времени, который прямо пропорционален скорости перемещения рабочего органа и площади среза, определяемой высотой слоя  $h$  и шириной ножа.

#### 4.3.4. Влияние скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя на энергоёмкость процесса выемки вермикомпоста

Исследования влияния на энергоёмкость  $\mathcal{E}_e$  скорости движения ножа  $V$  и высоты срезаемого слоя  $h$  позволили получить уравнение:

$$\mathcal{E}_e = 14,83 + (0,5V^2 - 0,3V + 0,337) / h. \quad (4.6)$$

Анализ выявил, что энергоёмкость обратно пропорциональна высоте слоя  $h$  и имеет квадратичную зависимость от скорости  $V$  с минимумом при  $V = 0,30$  м/с (рисунок 4.7).

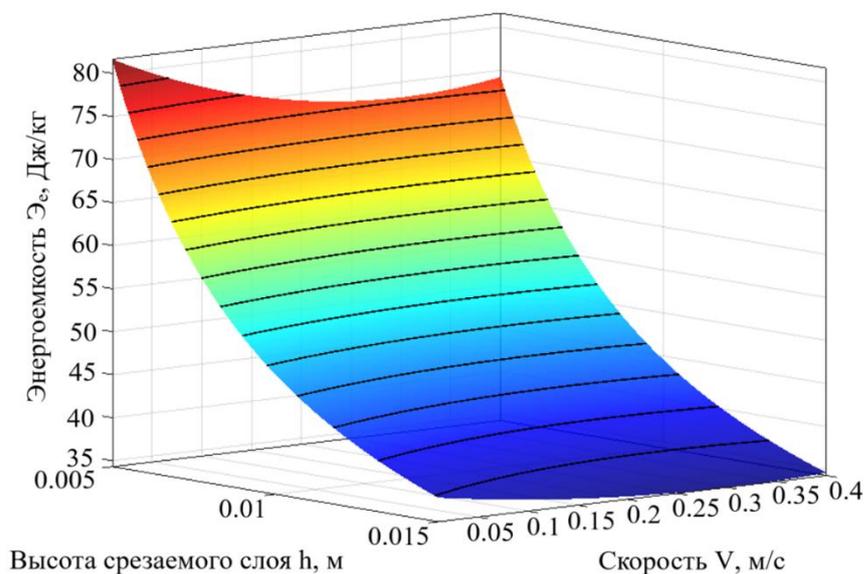


Рисунок 4.7 – Экспериментальная зависимость энергоёмкости процесса  $\mathcal{E}_e$  (Дж/кг) от скорости движения ножа  $V$  (м/с) и высоты срезаемого слоя (м)

Например, при скорости  $V = 0,3$  м/с увеличение высоты слоя с 0,005 до 0,015 м привело к снижению энергоёмкости с 73 до 33,4 Дж/кг. При высоте слоя  $h = 0,015$  м и изменении скорости с 0,01 до 0,3 м/с энергоёмкость уменьшилась с 35 до 33 Дж/кг, а дальнейшее увеличение скорости до 0,4 м/с привело к росту энергоёмкости до 34 Дж/кг. Зависимость адекватно описывается уравнением регрессии.

Таким образом, энергоёмкость процесса выемки вермикомпоста значительно снизилась с увеличением высоты срезаемого слоя  $h$  и достигла минимальных значений при скорости движения ножа  $V = 0,3$  м/с. Данная зависимость физически обусловлена тем, что при большей высоте слоя мощность привода распределяется на больший объем извлекаемого материала, снижая удельные затраты. Квадратичный характер зависимости от скорости объясняется снижением влияния трения покоя при увеличении скорости и ростом инерционных потерь при дальнейшем росте скорости.

Анализ зависимостей, полученных в ходе реализации двухфакторного эксперимента, позволил определить рациональные значения исследуемых параметров,

обеспечивающих оптимальное сочетание технологической эффективности и энергетических затрат в процессе выемки вермикомпоста. Оптимальная для процесса выемки вермикомпоста производительность при минимальной энергоёмкости  $\mathcal{E}_e = 33$  Дж/кг составляет  $Q = 3,1$  кг/с. Такие показатели могут быть достигнуты при скорости  $V = 0,3$  м/с и высоте слоя  $h = 0,015$  м.

Однако исследованиями установлено, что при высоких скоростях движения ножа устройства по выемке вермикомпоста  $V$  и большой высоте слоя самого материала  $h$  увеличиваются мощность необходимая для осуществления выемки и движущая сила, что требует более мощного и дорогостоящего оборудования. При малых скорости  $V$  и высоте слоя  $h$  падает производительность установки для производства вермикомпоста.

На рисунке 4.8 представлена графическая зависимость скорости движения ножа  $V$  (м/с) и высоты срезаемого слоя  $h$  (м), обеспечивающих оптимальные производительность и энергоёмкость процесса выемки вермикомпоста.

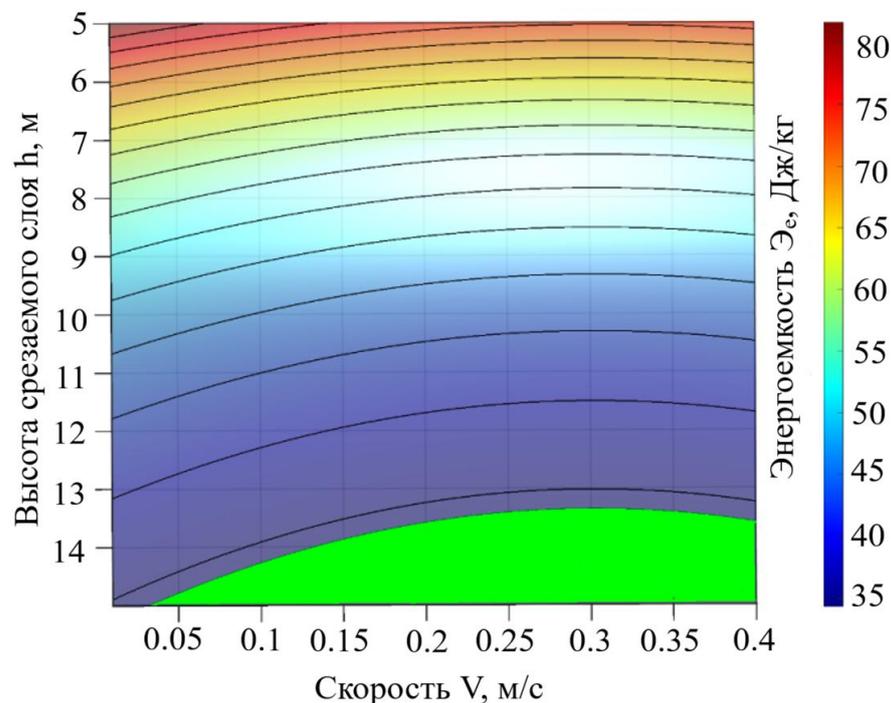


Рисунок 4.8 – Область значений скорости движения ножа  $V$  (м/с) и высоты срезаемого слоя  $h$  (м), обеспечивающих оптимальные производительность и энергоёмкость процесса выемки вермикомпоста

Рациональные значения параметров процесса выемки достигаются при скорости движения ножа  $V = 0,3$  м/с и высоте срезаемого слоя  $h = 0,015$  м. При этом обеспечивается высокая производительность  $Q \approx 3,1$  кг/с, умеренная мощность привода  $P_{\text{дв}} \approx 105$  Вт и минимальная энергоёмкость  $\mathcal{E}_e \approx 33$  Дж/кг.

#### 4.4. Результаты исследований влияния геометрических параметров рабочего органа на усилие выемки вермикомпоста из установки для его производства

Переход к трехфакторному эксперименту стал логическим продолжением двухфакторных исследований, поскольку только учет всех конструктивных особенностей рабочего органа позволяет достичь полной оптимизации процесса выемки вермикомпоста. Геометрические параметры ширина и длина ножа, а также угол его заострения напрямую влияют на распределение нагрузки и характер резания. Без их учета невозможно обеспечить стабильную работу устройства.

Эксперименты показали, что даже незначительные изменения геометрии могут существенно повлиять на движущую силу и равномерность выемки. Поэтому для комплексной оптимизации был применен план Бокса – Бенкена, позволивший выявить не только главные эффекты, но и их взаимодействия. Полученные модели подтвердили, что минимум энергозатрат достигается при строго определенном сочетании геометрических параметров.

На основе анализа работы установки по производству вермикомпоста были установлены основные уровни варьирования выделенных факторов оптимизации, представленные в таблице 4.2. Главным критерием оптимизации была выбрана движущая сила  $F_{\text{дв}}$ .

Таблица 4.2 – Факторы, уровни и интервалы варьирования

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

Для построения математической модели, процесса отделения готового слоя вермикомпоста от массива, в виде квадратичной функции был реализован метод планирования эксперимента, используемый для построения квадратичных моделей, матрица планирования которого приведена в таблице 4.3.

После выполнения всех экспериментальных исследований были получены результаты, для которого проводили проверку, определяющую равенство вариативности данных в разных группах с использованием критерия Кохрена. Данный критерий предназначен для оценки статистической согласованности дисперсий повторных измерений при условии трех и более выборок.

Таблица 4.3 – Матрица некомпозиционного трехфакторного плана Бокса – Бенкена для исследования процесса отделения готового слоя вермикомпоста

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F_{дв}$
1	1	1	0	229
2	-1	-1	0	143
3	1	-1	0	157
4	-1	1	0	182
5	1	0	1	176
6	-1	0	-1	172
7	1	0	-1	216
8	-1	0	1	165
9	0	1	1	195
10	0	-1	-1	157
11	0	1	-1	238
12	0	-1	1	164
13	0	0	0	159
14	0	0	0	157
15	0	0	0	158

По формуле (3.7) рассчитывали показатели разброса значений отклика  $S_{уи}^2$ , после этого определяли критерий оценки воспроизводимости экспериментальных данных Кохрена по формуле (3.6):

$$G_{расч} = 0,10. \quad (4.7)$$

Значение критерия для уровня значимости  $\alpha=0,05$ , числа степеней свободы  $f_u = 2$  и числа опытов  $N=15$  составляет  $G_{табл} = 0,198$  [67]. Следовательно,

$G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$  что подтверждает согласованность результатов параллельных опытов и допустимость их дальнейшего усреднения.

Расчёт параметров полиномиальной модели определяли по формуле (4.4) с использованием программы MathCab. Выбор данной программы обусловлен её удобством для матричных операций и возможностью наглядной визуализации промежуточных результатов.

Полученные коэффициенты регрессии:  $b_0 = 158$ ;  $b_1 = 14,5$ ;  $b_2 = 27,875$ ;  $b_3 = -10,375$ ;  $b_{12} = 8,25$ ;  $b_{13} = -8,25$ ;  $b_{23} = -12,5$ ;  $b_{11} = 6,75$ ;  $b_{22} = 13$ ;  $b_{33} = 17,5$ .

Для статистического анализа адекватности построенной модели была проведена оценка дисперсии коэффициентов регрессии относительно их истинных значений, характеризующая ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, рассчитывали по формуле (3.13); при этом дисперсию  $S_{yu}^2$  воспроизводимости параметра оптимизации определяли по результатам опыта все промежуточные значения, необходимые для вычисления, были представлены в вспомогательной таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Вспомогательная таблица для расчета  $S_{yu}^2$

Номер опыта в центре плана	$y_i$	$y_i$	$ y_i - y_i $	$(y_i - y_i)^2$
13	159	158,0	1	1
14	157		-1	1
15	158		0	0

Используя для проверки гипотез о равенстве средних значений в двух выборках критерия Стьюдента получили доверительные интервалы оценок коэффициентов при 5%-м уровне значимости, числе степеней свободы  $f_1 = 2$  и величине критерия Стьюдента  $t_{0,05} = 4,303$  [69]:  $\Delta b_0 = 1,43$ ;  $\Delta b_i = 0,54$ ;  $\Delta b_{ij} = 1,075$ ;  $\Delta b_{ii} = 1,43$ .

Проверка гипотезы о значимости отдельных коэффициентов уравнения регрессии осуществлялась на основе сравнения абсолютного значения оцениваемого параметра с границами его доверительного интервала, рассчитанного при заданном уровне значимости, которую определяли следующим условием  $|b_i| > \Delta b_i$ . Таким образом, коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  являются статистически значимыми.

Для удобства статистического анализа и оптимизации геометрических параметров полученная регрессионная зависимость была приведена к безразмерному виду. Итоговое уравнение связи между откликом и кодированными значениями независимых факторов имеет вид:

$$y = 158 + 14,5x_1 + 27,875x_2 - 10,375x_3 + 8,25x_1x_2 - 8,25x_1x_3 - 12,5x_2x_3 + 6,75x_1^2 + 13x_2^2 + 17,5x_3^2. \quad (4.8)$$

Для практического применения полученной регрессионной зависимости и удобства интерпретации влияния каждого параметра в физических единицах измерения была выполнена процедура раскодирования независимых переменных. В результате преобразования факторов уравнение регрессии (4.9) приняло вид:

$$Q = -3613,5875 - 4150h_{\text{н}} - 3093,75L_{\text{н}} - 6,0125\alpha + 82500h_{\text{н}}L_{\text{н}} - 165h_{\text{н}}\alpha - 62,5L_{\text{н}}\alpha + 270000h_{\text{н}}^2 + 32500L_{\text{н}}^2 + 0,175\alpha^2. \quad (4.9)$$

Соответствие полученной математической модели экспериментальным значениям проверяли с помощью критерию Фишера. Сумма квадратов отклонений  $S_{\text{ад}}^2$  расчётных и экспериментальных значений во всех точках плана определялась по формуле:

$$S_R = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 = 35,5. \quad (4.10)$$

Расчетное значение адекватности математической модели критерия Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2} = \frac{11,2}{1} = 11,2. \quad (4.11)$$

Табличное значение критерия Фишера составляет  $F_{\text{табл}} = 19,6$  [69].

Исходя из условия ( $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ ) наше уравнение регрессии можно признать адекватно описывающим процесс выемки вермикомпоста.

Для определения координат точки оптимума функции отклика была сформирована система уравнений. Процедура заключалась в вычислении частных производных целевой функции по каждому из трёх независимых факторов и приравнивании полученных выражений к нулю.

Система таких дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dy_{F_{дв}}}{dx_1} = 13,5x_1 + 8,25x_2 - 8,25x_3 + 14,5 = 0; \\ \frac{dy_{F_{дв}}}{dx_2} = 8,25x_1 + 26x_2 - 12,5x_3 + 27,875 = 0; \\ \frac{dy_{F_{дв}}}{dx_3} = -8,25x_1 - 12,5x_2 + 35x_3 - 10,375 = 0. \end{cases} \quad (4.12)$$

Решая полученную систему линейных алгебраических уравнений (4.12) с помощью метода обратной матрицы с использованием программного пакета математического моделирования MatCab, определили оптимальные значения факторов оптимизации: ширина ножа, длина ножа и угол заострения ножа, которые представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Оптимальные значения факторов

Фактор	Значение фактора	
	кодированное	раскодированное
$h_n$ – ширина ножа, м	$x_1 = -0,595$	$h_n = 0,00704$
$l_n$ – длина ножа, м	$x_2 = -0,976$	$L_n = 0,07048$
$\beta$ – угол заострения ножа, град	$x_3 = -0,192$	$\beta = 33,08$

Строя контурные кривые поверхности отклика для оптимальных значений факторов оптимизации, оптимальные факторы подставили в уравнение (4.8).

Для  $x_1 = -0,595$  получили выражение:

$$Y = 151,76 + 22,975x_2 - 5,475x_3 - 12,5x_2x_3 + 13x_2^2 + 17,5x_3^2. \quad (4.13)$$

Аналогично для  $x_2 = -0,976$ :

$$Y = 143,174 - 6,448x_1 + 1,825x_3 - 8,25x_1x_3 + 6,75x_1^2 + 17,5x_3^2. \quad (4.14)$$

Аналогично для  $x_3 = -0,192$ :

$$Y = 160,673 + 16,084x_1 + 30,275x_2 + 8,25x_1x_2 + 6,75x_1^2 + 13x_2^2. \quad (4.15)$$

Следующим этапом математического анализа стало преобразование уравнений регрессии (4.13)–(4.15) к простейшему стандартному виду с помощью

замены переменных, поворота осей. Для этого начало координат перенесли в особую точку, соответствующую центру фигуры.

Для определения координат центра  $S$  фигуры поверхности отклика уравнение (4.13), (4.14) и (4.15) дифференцировали по всем варьируемым факторам  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ .

Полученные уравнения приравняли к нулю:

$$\begin{cases} \frac{dY}{dx_2} = 22,975 + 26x_2 - 12,5x_3 = 0; \\ \frac{dY}{dx_3} = -5,101 - 12,5x_2 + 35x_3 = 0, \end{cases} \quad (4.16)$$

откуда получили  $x_{2S} = -0,976$  и  $x_{3S} = -0,192$ .

$$\begin{cases} \frac{dY}{dx_1} = 6,448 + 13,5x_1 - 8,25x_3 = 0; \\ \frac{dY}{dx_3} = 1,825 - 8,25x_1 + 35x_3 = 0, \end{cases} \quad (4.17)$$

откуда получили  $x_{1S} = -0,595$  и  $x_{3S} = -0,192$ .

$$\begin{cases} \frac{dY}{dx_1} = 16,084 + 13,5x_1 + 8,25x_2 = 0; \\ \frac{dY}{dx_2} = 30,275 + 8,25x_1 + 26x_2 = 0, \end{cases} \quad (4.18)$$

откуда получили  $x_{1S} = -0,973$  и  $x_{2S} = -0,856$ .

Подставив в уравнение (4.13) вместо  $x_2$  и  $x_3$  координаты центра фигуры  $x_{2S}$  и  $x_{3S}$ , получили значение равномерности  $Y_l = 141$  в центре поверхности отклика.

Подставив в уравнение (4.14) вместо  $x_1$  и  $x_3$  координаты центра фигуры  $x_{1S}$  и  $x_{3S}$ , получили значение равномерности  $Y_l = 141$  в центре поверхности отклика.

Подставив в уравнение (4.15) вместо  $x_1$  и  $x_2$  координаты центра фигуры  $x_{1S}$  и  $x_{2S}$ , получили значение равномерности  $Y_l = 141$  в центре поверхности отклика.

Угол поворота осей координат в точке  $S$ :

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{b_{23}}{(b_{22} - b_{33})} \Rightarrow \alpha_1 = -32,27;$$

$$\operatorname{tg}2\alpha = \frac{b_{13}}{(b_{11} - b_{33})} \Rightarrow \alpha_2 = 32,337; \quad (4.19)$$

$$\operatorname{tg}2\alpha = \frac{b_{12}}{(b_{11} - b_{22})} \Rightarrow \alpha_3 = -35,621.$$

Канонические коэффициенты:

$$\begin{cases} B_{22} = b_{22}\cos^2\alpha + b_{23}\cos\alpha\sin\alpha + b_{33}\sin^2\alpha = 21,749; \\ B_{33} = b_{22}\sin^2\alpha + b_{23}\sin\alpha\cos\alpha + b_{33}\cos^2\alpha = 8,751; \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_{11} = b_{11}\cos^2\alpha + b_{23}\cos\alpha\sin\alpha + b_{33}\sin^2\alpha = 9,592; \\ B_{33} = b_{11}\sin^2\alpha + b_{23}\sin\alpha\cos\alpha + b_{33}\cos^2\alpha = 14,658; \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\begin{cases} B_{11} = b_{11}\cos^2\alpha + b_{12}\cos\alpha\sin\alpha + b_{22}\sin^2\alpha = 8,021; \\ B_{33} = b_{11}\sin^2\alpha + b_{12}\sin\alpha\cos\alpha + b_{22}\cos^2\alpha = 11,729. \end{cases}$$

Канонические формы уравнения регрессии имеют вид:

$$Y - 141 = 21,749X_2^2 + 8,751X_3^2; \quad (4.21)$$

$$Y - 141 = 9,592X_1^2 + 14,658X_3^2; \quad (4.22)$$

$$Y - 141 = 8,021X_1^2 + 11,729X_2^2. \quad (4.23)$$

Полученные выражения (4.21), (4.22) и (4.23) имеют вид квадратичных уравнений двух переменных и описывают геометрические места точек в факторном пространстве, соответствующих фиксированным значениям отклика. Анализ структуры этих уравнений показал, что коэффициенты при квадратах обеих переменных имеют одинаковые знаки (в данном случае положительные), а смешанный член отсутствует или приведён к канонической форме. Такая структура уравнения является характерным признаком эллипса.

Для построения контурных сечений поверхности отклика в каждое из уравнений (4.21), (4.21), (4.23) подставляли конкретные, заранее заданные значения критерия оптимизации, соответствующие различным уровням отклика. В результате такой подстановки получали уравнения линий уровня контурных кривых, каждая из которых представляет собой эллипс, отражающий комбинации факторов, при которых достигается одно и то же значение оптимизируемого параметра.

Эти эллиптические контуры были использованы для визуализации формы поверхности отклика в виде её горизонтальных сечений. Графическое построение указанных сечений позволило наглядно оценить характер влияния варьируемых факторов на отклик, выявить направления наискорейшего роста или снижения параметра, а также определить область оптимальных значений. Результаты визуализации представлены на рисунках 4.5–4.7.

Графический анализ поверхности откликов для каждого конкретного случая позволил определить оптимальные значения движущей силы  $F_{дв}$  в зависимости от ширины ножа  $h_n$  ( $X_1$ ), длины ножа  $l_n$  ( $X_2$ ), угла заострения ножа  $\beta$  ( $X_3$ ) [67].

На рисунке 4.9 представлена поверхность отклика, характеризующая показатель движущей силы в зависимости от ширины ножа и угла его заострения при высоте ножа 0,00704 м. Данное сечение демонстрирует зависимость движущей силы от комбинации длины ножа и угла его заострения при оптимальной ширине. Уравнение (4.21) подтверждает эллиптическую форму поверхности отклика.

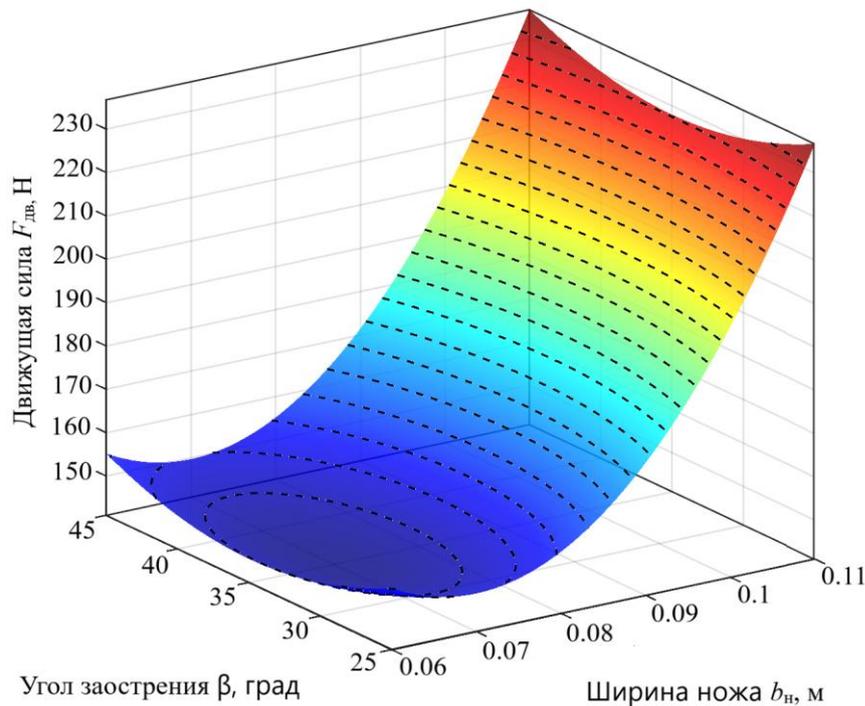


Рисунок 4.9 – Поверхность отклика, характеризующая показатель  $F_{дв}$  в зависимости от ширины ножа  $b_n$  ( $X_2$ ) и угла заострения  $\beta$  ( $X_3$ ) при высоте ножа  $h_n = 0,007$  м

Изменение угла заострения в заданных пределах обеспечивает процесс резания, усилие незначительно изменяется при отклонениях от оптимального угла,

что указывает на большую чувствительность движущей силы к изменениям длины ножа по сравнению с углом заострения.

Центр поверхности отклика расположен в точке ( $l_n = 0,07048$  м;  $\beta = 33,08$ ), где значение движущей силы минимально ( $F_{дв} = 141$  Н). При отклонении от оптимального угла в любую сторону наблюдалось увеличение движущей силы. Так, при  $\beta < 30$  возрастает трение между лезвием и материалом, а при  $\beta > 35$  увеличивается площадь соприкосновения, что приводит к росту силы сопротивления резанию.

Длина ножа оказывает более выраженное влияние на движущую силу, при отклонении от оптимального значения ( $l_n = 0,07048$  м) наблюдалось увеличение силы сопротивления из-за неравномерного распределения нагрузки по рабочей поверхности.

На рисунке 4.10 представлена поверхность отклика, характеризующая показатель движущей силы в зависимости от высоты ножа и угла его заострения при ширине ножа 0,07 м.

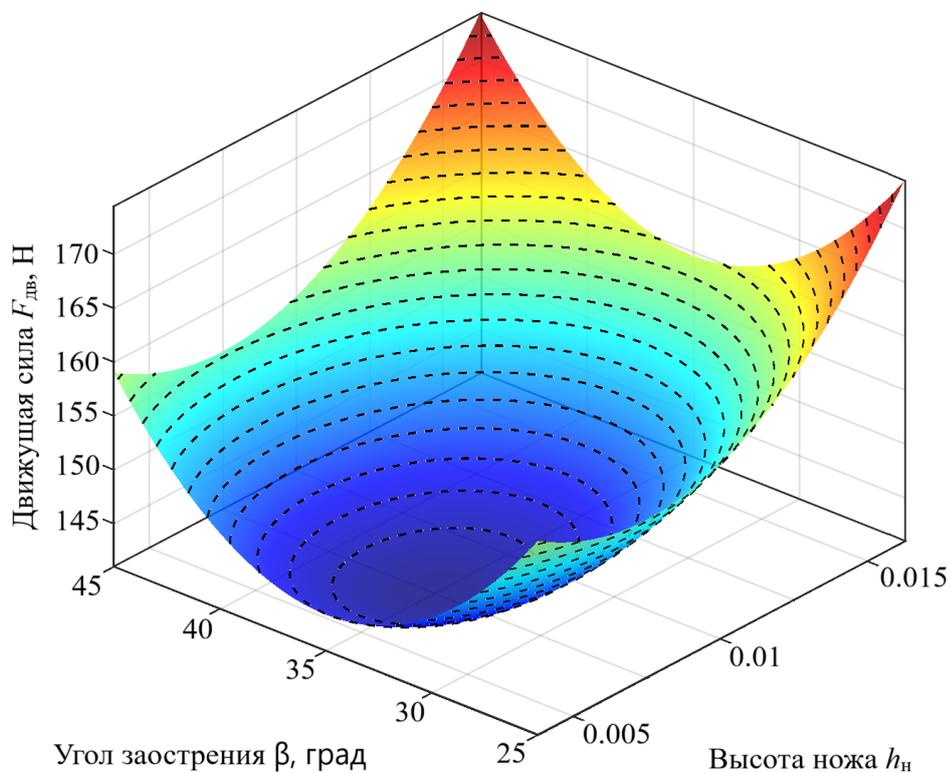


Рисунок 4.10 – Поверхность отклика, характеризующая показатель  $F_{дв}$  в зависимости от высоты ножа  $h_n$  ( $X_1$ ) и угла заострения  $\beta$  ( $X_3$ ) при ширине ножа  $b_n = 0,07$  м

Это сечение иллюстрирует взаимодействие ширины ножа и угла его заострения при оптимальной длине. Уравнение (4.22) также подтверждает эллиптическую форму поверхности отклика.

Угол заострения оказывает влияние на движущую силу. При его отклонении от оптимального значения на  $\pm 10^\circ$  наблюдалось увеличение движущей силы на 15–20 %.

Центр поверхности отклика совпадает с оптимальными параметрами  $h_n = 0,00704$  м,  $\beta = 33,08$ , где  $F_{дв} = 141$  Н.

При увеличении ширины ножа сверх оптимального значения ( $h_n > 0,00704$  м) наблюдалось увеличение инерционной составляющей силы сопротивления, тогда как при ее уменьшении ( $h_n < 0,00704$ ) нагрузка концентрировалась в узкой зоне, что приводило к повышению местных напряжений.

На рисунке 4.11 представлена поверхность отклика, характеризующая показатель движущей в зависимости от высоты ножа и его ширины при угле заострения 33 град. Это сечение демонстрирует взаимодействие ширины и длины ножа при оптимальном угле заострения.

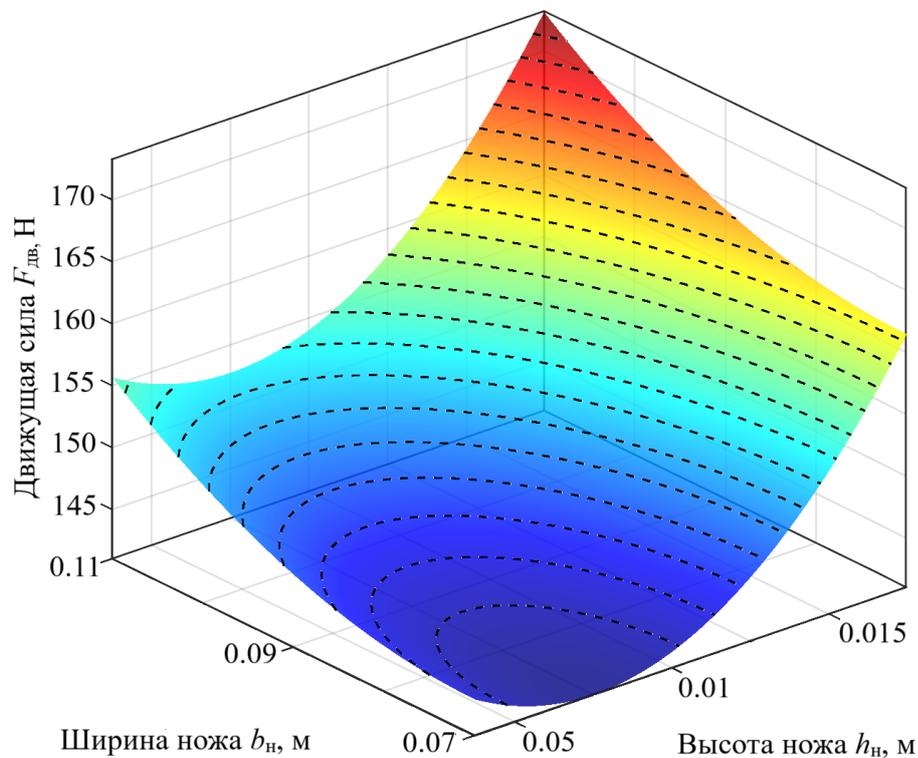


Рисунок 4.11 – Поверхность отклика, характеризующая показатель  $F_{дв}$  в зависимости от высоты ножа  $h_n$  ( $X_1$ ) и его ширины  $b_n$  ( $X_2$ ) при угле заострения  $\beta = 33$  град.

Уравнение (4.23) показывает эллиптическую форму поверхности отклика. График указывает на большую чувствительность движущей силы к изменениям ширины ножа по сравнению с длиной.

Центр поверхности отклика (см. рисунок 4.11) расположен в точке ( $h_n = 0,00704$  м,  $b_n = 0,07048$  м), где  $F_{дв} = 141$  Н.

Анализ кривых (см. рисунок 4.11) показал, что при увеличении ширины ножа сверх оптимального значения ( $b_n > 0,07048$  м) наблюдается рост инерционных потерь, тогда как при ее уменьшении ( $b_n < 0,07048$ ) уменьшается площадь контакта с материалом, что приводит к уменьшению удельного сопротивления резанию. Однако в дальнейшем уменьшение длины ножа нецелесообразно.

Высота ножа оказывает более выраженное влияние на движущую силу, при ее отклонении от оптимального значения ( $h_n = 0,00704$  м) наблюдается увеличение  $F_{дв}$ .

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса выемки готового слоя вермикомпоста получены уравнения регрессии и графические зависимости, объединяющие исследуемые параметры: ширина ножа, длина ножа и угол заострения ножа, и критерии оптимизации процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора, а именно движущей силы. Их анализ позволил обосновать рациональные значения перечисленных выше параметров установки для производства вермикомпоста.

#### **4.5. Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований**

Адекватность разработанных математических моделей и достоверность экспериментальных данных подтверждена удовлетворительной сходимостью. Сравнение значений, полученных на основе аналитических зависимостей и регрессионных моделей, с данными, полученными в ходе натуральных экспериментов, показало, что расхождение не выходит за пределы допустимого отклонения 5 %. В

частности, относительная погрешность между расчётными и экспериментальными значениями:

- по движущей силе  $F_{дв}$  – 4,4 %;
- по производительности  $Q$  – 3,9 %.

Такая степень согласованности свидетельствует о высокой адекватности разработанных математических моделей реальному технологическому процессу и подтверждает обоснованность принятых теоретических допущений [69].

На рисунках 4.12 и 4.13 приведены графические зависимости движущей силы  $F_{дв}$  и производительности  $Q$  при различной высоте ножа при условии оптимальных геометрических параметров ножа.

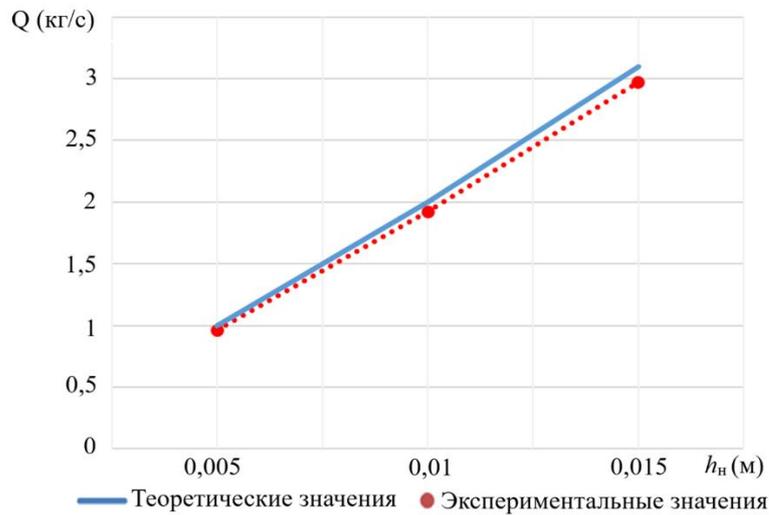


Рисунок 4.12 – Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований производительности  $Q$  (кг/с) в зависимости от высоты ножа  $h_n$  (м)

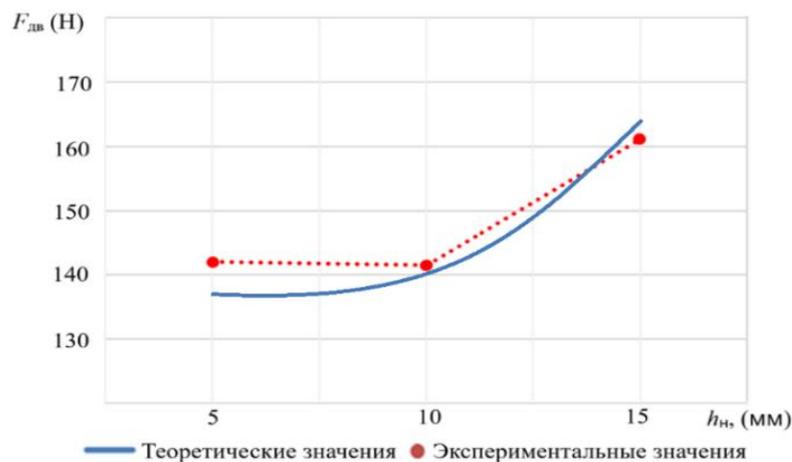


Рисунок 4.13 – Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований движущей силы  $F_{дв}$  (Н) в зависимости высоты ножа  $h_n$  (мм)

Проведённый анализ выявленных функциональных зависимостей подтвердил устойчивый и закономерный характер изменения критериев оптимизации, таких, как движущая сила, производительность, энергоёмкость и др.) в зависимости от варьируемых технологических факторов, в частности, скорости движения рабочего органа и высоты снимаемого слоя вермикомпоста. Наблюдаемые тенденции соответствуют физической сущности процесса и согласуются с теоретическими представлениями о механизме взаимодействия рабочего органа с материалом.

Особого внимания заслуживает тот факт, что области рациональных значений параметров, т. е. таких сочетаний факторов, при которых достигается приемлемый баланс между производительностью и энергозатратами, практически полностью совпадают с областью оптимальных значений, определённых математически. Это позволяет сделать вывод о высокой практической применимости полученных решений и отсутствии необходимости введения существенных корректировок при переходе от теоретических рекомендаций к реальному производству. Сопоставление теоретических значений, рассчитанных на основе аналитических зависимостей, представленных во второй главе, с экспериментальными данными, полученными в ходе лабораторных испытаний, показало удовлетворительную сходимость результатов по всему диапазону исследованных режимов. Отклонения находятся в пределах погрешности измерений и не превышают 5 %, что подтверждает адекватность предложенных моделей и обоснованность методики расчёта. Таким образом, можно утверждать, что разработанные теоретические положения и экспериментальные данные взаимно дополняют и подтверждают друг друга, обеспечивая надёжную основу для проектирования и совершенствования оборудования для выемки вермикомпоста.

#### **4.6. Выводы по главе**

1. Исследован процесс просыпания вермикомпоста через решето нижнего основания, а также получены уравнения регрессии, которые характеризуют зависимость количества, просыпанного вермикомпоста (%) от размеров ячейки для

процессов выемки и подкормки. Установлен оптимальный размеры ячейки  $50 \times 50$  мм.

2. В результате проведения экспериментальных исследований установлены зависимости движущей силы  $F_{\text{дв}}$ , общей мощности на выполнение процесса выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора  $P_{\text{дв}}$ , производительности  $Q$  и энергоёмкости  $\mathcal{E}_e$  от исследуемых факторов – скорости движения ножа  $V$  и высоты срезаемого слоя  $h$ .

3. В результате проведенного трехфакторного эксперимента установлены оптимальные геометрические параметры устройства по выемке вермикомпоста. Ширина  $b_{\text{н}} = 0,07048$  м, его высота  $h_{\text{н}} = 0,00704$ , угол заострения  $\beta = 33,08$  град.

4. Установлены рациональные значения исследуемых режимных факторов, при которых производительность и энергоёмкость процесса выемки вермикомпоста соответствуют требованиям эффективной эксплуатации: скорость движения ножа  $V = 0,3$  м/с; высота срезаемого слоя  $h = 0,015$  м, ширина ножа  $b_{\text{н}} = 0,07048$  м, угол заострения  $\beta = 33,08$  град.

5. Интерпретация уравнений регрессии и поверхностей отклика позволил обосновать значения критериев оптимизации при рекомендуемых значениях исследуемых факторов. При скорости  $V = 0,3$  м/с и высоте слоя  $h = 0,015$  м величина движущей силы  $F_{\text{дв}} \approx 350$  Н; мощность привода  $P_{\text{дв}} \approx 105$  Вт; производительность  $Q \approx 3,1$  кг/с; энергоёмкость  $\mathcal{E}_e \approx 33$  Дж/кг. Полученные расчётные данные служат основой для формирования технических рекомендаций по эксплуатации установки вермикомпостирования и прогнозирования её производительности в заданном диапазоне факторов

6. Подтверждена эффективность применения устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора: устройство обеспечивает механизированную выемку с высокой производительностью и умеренными энергозатратами.

## 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

### 5.1. Производственные испытания установки для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора

Производственные испытания опытного образца установки для производства вермикомпоста, оснащенной устройством для механизированной выемки готового продукта из вермиинкубатора, проводились на базе в АО «Совхоз – Весна» Саратовской области.

Производственные испытания проводились с целью опытной проверки работоспособности и оценки эксплуатационных характеристик предложенной конструктивно-технологической схемы производства вермикомпоста.

В ходе испытаний решали следующие задачи:

- экспериментальная проверка достоверности теоретических положений, заложенных в основу разработанной модели;
- определение и уточнение оптимальных режимных параметров функционирования опытного образца оборудования в условиях реального производства;
- оценка технико-экономических показателей нового решения, включая производительность, энергоёмкость, затраты труда и себестоимость продукции, с последующим сопоставлением полученных данных с аналогичными характеристиками существующей технологии вермикомпостирования.

Такой подход позволяет подтвердить научную обоснованность предложенных инженерных решений и продемонстрировать их практическую целесообразность и конкурентоспособность на фоне существующих методов.

Производство вермикомпоста осуществлялась в соответствии с методикой, изложенной в главе 3.

Опытный образец установки (рисунок 5.1), оснащенный электроприводом и продольно-движущимся трапециевидным ножом, был размещен в производственном помещении. Тензодатчик SBA-100L измерял усилия, возникающие при движении ножа в слое материала. Параметры модульной установки представлены в таблице 5.1.



Рисунок 5.1 – Общий вид установки для производства вермикомпоста

Таблица 5.1 – Параметры модульной установки для производства вермикомпоста с механизированным устройством для выемки готового слоя вермикомпоста

Параметр	Значение
Габаритные размеры установки, мм	
длина	3250
ширина	1300
высота	1250
Размеры ячеек нижнего основания, мм	50×50
Рабочий объем установки, м <sup>3</sup>	1,2
Устройство для выемки вермикомпоста	
производительность, т/ч	11,16
скорость, м/с	0,3
высота срезаемого слоя, мм	15
угол заострения режущей кромки ножа, град.	33

Эффективность внедрения предлагаемого устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора подтверждается сравнением существующей технологии вермикомпостирования в вермиинкубаторах с технологией, использующей предлагаемую установку для производства вермикомпоста оснащенной устройством по выемке готового слоя из вермиинкубатора. Расчеты выполнены согласно методике с учетом цен на январь 2026 года [71, 72, 93].

## 5.2. Расчет технико-экономической эффективности

Ожидаемая экономическая выгода от внедрения разработанного оборудования была рассчитана в соответствии с утверждённой методикой оценки эффективности инновационных решений. Проведённый расчёт показал достоверное снижение эксплуатационных затрат, рост производительности труда и сокращение себестоимости единицы продукции. Полученные результаты подтверждают экономическую целесообразность и практическую перспективность внедрения данного оборудования в производственные процессы АО «Совхоз – Весна».

В настоящее время на предприятии используется ручной труд для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора и дальнейших операций с ним. Производительность труда  $P_1 = 0,76$  т/ч на одного рабочего, или 3,04 т/ч на бригаду из 4 человек.

При использовании устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора производительность  $P_2 = 11,16$  т/ч.

В первом случае комплекс производства вермикомпоста обслуживают 4 человека, а вермиинкубатор, оснащенный устройством для выемки вермикомпоста, будет обслуживать персонал, состоящий из 2 человек.

Годовую нормативную загрузку  $T_n$  (ч) определяли исходя из годового объема вермикомпоста необходимого предприятию  $V$  и производительности  $P$ . При условии одинакового потребления органического удобрения предприятием:

$$T_{\text{п}} = \frac{B}{\Pi}. \quad (5.1)$$

Затраты труда  $H$  (чел./т), зависящие от производительности процесса выемки вермикомпоста из вермиинкубатора, определяли по формуле:

$$H = \frac{L}{\Pi}, \quad (5.2)$$

где  $L$  – обслуживающий персонал, чел.

Снижение трудоемкости  $H'$  (%) процесса выемки вермикомпоста:

$$H' = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \cdot 100 \%. \quad (5.3)$$

Издержки по заработной плате рабочих  $Z_{\text{в}}$  (руб./т) в зависимости от тарифной ставки сотрудника  $Z_{\text{ч}}$ , количества сотрудников  $L$  и производительности процесса выемки вермикомпоста  $\Pi$  определяли по формуле:

$$Z_{\text{в}} = \frac{LZ_{\text{ч}}}{\Pi}. \quad (5.4)$$

Амортизационные отчисления и отчисление на техническое обслуживание установки для производства вермикомпоста  $A_{\text{ТО}}$  (руб./т) рассчитывали по формуле:

$$A_{\text{ТО}} = \frac{Ca}{100B}, \quad (5.5)$$

где  $a$  – норма амортизационных отчислений и отчислений за ТО,  $a = 11,1 \%$ .

Накладные затраты  $H_3$  (руб./т) на процесс выемки вермикомпоста из вермиинкубатора:

$$H_3 = 0,5(Z_{\text{в}} + A_{\text{ТО}}). \quad (5.6)$$

Прямые затраты  $\Pi_3$  (руб./т) представляют собой сумму трёх ключевых компонентов затрат, на заработную плату рабочим, стоимости энергозатрат, амортизационных отчислений и стоимости накладных затрат на процесс выемки:

$$\Pi_3 = Z_B + P_3 + A_{ГО} + H_3. \quad (5.7)$$

Снижение прямых затрат  $\Pi_3'$  (%) на осуществление процесса выемки вермикомпоста:

$$\Pi_3' = \frac{\Pi_{3_1} - \Pi_{3_2}}{\Pi_{3_1}} \cdot 100 \%. \quad (5.8)$$

Приведенные капиталовложения  $\Pi_{КВ}$  (руб./т) для осуществления процесса производства органического удобрения вермикомпоста:

$$\Pi_{КВ} = \frac{CE_H}{ВП}, \quad (5.9)$$

где  $E_H$  – коэффициент эффективности капиталовложений,  $E = 0,15$ .

Приведенные затраты  $\Pi_{пр}$  (руб./т) определяли как сумму капиталовложений  $\Pi_{КВ}$  и прямых затрат  $\Pi_3$ :

$$\Pi_{пр} = \Pi_3 + \Pi_{КВ}. \quad (5.10)$$

Снижение приведенных затрат:

$$\Pi_{пр}' = \frac{\Pi_{пр_1} - \Pi_{пр_2}}{\Pi_{пр_1}} \cdot 100 \%. \quad (5.11)$$

Ожидаемый годовой экономический эффект  $\mathcal{E}_Г$  (руб.) от внедрения в производство механизированного устройства для выемки вермикомпоста:

$$\mathcal{E}_Г = (\Pi_{пр_1} - \Pi_{пр_2})В. \quad (5.12)$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений  $T_{ок}$  (лет):

$$T_{ок} = \frac{C_2 - C_1}{\mathcal{E}_Г}. \quad (5.13)$$

Как видно из таблицы 5.2, внедрение предлагаемого устройства экономически выгодно.

Таблица 5.2 – Расчет экономической эффективности при внедрении предлагаемого устройства для выемки вермикомпоста

Экономический параметр	Обозначение	Технология	
		существующая	предлагаемая
Балансовая стоимость, руб.	С	296000	348000
Производительность за 1 ч чистого времени, т/ч	П	3,04	11,16
Годовая нормативная загрузка, ч	$T_{п}$	42,76	11,65
Годовой объем работ, т	В	130	130
Обслуживающий персонал, чел.	Л	4	2
Затраты труда, чел./т	Н	1,31	0,18
Снижение трудоемкости, %	$N'$	–	86,2
Часовая тарифная ставка, руб.	$Z_{ч}$	230	230
Издержки по зарплате, руб./т	$Z_{в}$	302	41,2
Расход электроэнергии, кВт·ч	$Q_{ч}$	–	1,5
Стоимость электроэнергии, руб.	$Ц_{э}$	–	12
Удельные затраты электроэнергии на 1 т вермикомпоста, руб.	$P_{э}$	–	1,61
Амортизационные отчисления, руб./т	$A_{ТО}$	252	297
Накладные расходы, руб./т	$H_{з}$	277	169,1
Прямые затраты, руб./т	$П_{з}$	831	589,9
Снижение прямых затрат, %	$П_{з}'$	–	29
Приведенные капиталовложения, руб./т	$П_{кв}$	112,3	35,9
Приведенные затраты, руб./т	$П_{пр}$	943,3	625,8
Снижение приведенных затрат, %	$П_{пр}'$	–	33,6
Годовой экономический эффект, руб.	$Э_{г}$	–	41275
Срок окупаемости дополнительных капиталовложений, лет	$T_{ок}$	–	1,26

### 5.3. Выводы по главе

1. Проведенные производственные испытания подтвердили технологическую надежность и эффективность предложенной установки по производству вермикомпоста оснащенной устройством для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора. Производительность установки составила 11,16 т/ч.

2. При использовании устройства для выемки готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора расчетный годовой экономический эффект 41275 руб. в ценах на январь 2026, а срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составит 1,26 года.

3. При потребности сельскохозяйственных предприятий региона в 3750 тон расчетный экономический эффект составит – 1190625 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выполненной работы стало комплексное решение актуальной задачи повышение производительности и обоснование рациональных конструктивно-режимных параметров установки для производства вермикомпоста путем разработки конструкции механизированного устройства для выемки вермикомпоста из вермиинкубатора и исследования его работы. Полученные теоретические и экспериментальные зависимости для усилия взаимодействия, общей мощности привода, производительности и энергоемкости 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 переработки органических отходов в высококачественное удобрение.

1. На основании анализа литературных источников и существующих устройств, и технологий для осуществления процесса вермикомпостирования установлено отсутствие специализированных технических средств для механизированной выемки вермикомпоста из вермиинкубатора. Существующие методы основаны на ручном труде или универсальных машинах, что обуславливает высокую трудоемкость и низкую производительность процесса выемки готового вермикомпоста и процесса вермикомпостирования в целом.

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 математические формулы, описывающие связь усилия взаимодействия с основными параметрами рабочего органа и физико-механическими свойствами вермикомпоста: выражение (2.46) для движущей

силы, формула (2.49) для мощности привода, выражение (2.51) для производительности и (2.53) 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 процесса выемки вермикомпоста установлены зависимости движущей силы, общей мощности привода, производительности и энергоёмкости от конструктивно-режимных параметров. Максимальная производительность 3,1 кг/с достигается при высоте слоя  $h = 0,015$  м и скорости  $V = 0,3$  м/с. Рациональная энергоёмкость  $\mathcal{E}_e = 33,5$  Дж/кг обеспечивается при скорости  $V = 0,3$  м/с, высоте слоя  $h = 0,015$  м, ширине ножа  $h_n = 0,007$  м, его длине  $l_n = 0,07$  м и угле заострения  $\beta = 33$  град. Оптимальные размеры отверстий решетчатого основания  $50 \times 50$  мм, обеспечивающий минимальное просыпание материала в процессе вермикомпостирования.

5. Внедрение разработанного устройства в АО «Совхоз – Весна» Саратовской области позволило получить расчетный экономический эффект составил 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Покровская, С. Ф.* Вермикомпостирование / С. Ф. Покровская, Ф. Б. Прижуков // Земледелие. – 1990. – № 12. – С. 57–59.
2. *Кодолова, О. П.* О влиянии некоторых факторов среды на жизнедеятельность навозного червя / О. П. Кодолова, Г. Н. Нефедов, Л. В. Путилова // Тез. докл. участников 2-го международного конгресса «Биоконверсия органических отходов народного хозяйства и охрана окружающей среды». – Ивано-Франковск, 1992. – С. 16–17.
3. *Слободян, В. А.* Развитие вермикультуры на различных видах органических отходов / В. А. Слободян // Тез. докл. участников 2-го международного конгресса «Биоконверсия органических отходов народного хозяйства и охрана окружающей среды». – Ивано-Франковск, 1992. – С. 18–19.
4. *Якушев, Я. О.* Навозный червь в теплицах / Я. О. Якушев, А. А. Бухта // Тез. докл. участников 2-го международного конгресса «Биоконверсия органических отходов народного хозяйства и охрана окружающей среды». – Ивано-Франковск, 1992. – С. 38–40.
5. *Варфоломеев, Л. А.* Производство органических удобрений из древесных отходов и применение их в земледелии / Л. А. Варфоломеев, Т. Б. Лагутина // Тез. докл. участников 2-го международного конгресса «Биоконверсия органических отходов народного хозяйства и охрана окружающей среды». – Ивано-Франковск, 1992. – С. 85–89.
6. *Морев, Ю. В.* Вермикультивирование, производство и применение биогумуса / Ю. В. Морев; Уральский научно-исследовательский институт сельского хозяйства. – Екатеринбург, 1992. – 32. с.
7. *Мельник, И. А.* Вермикультура: организация хозяйства, технология разведения червей и производство биогумуса / И. А. Мельник, И. П. Карпец // Зерновые культуры. – 1998. – № 1. – С. 6–8.
8. *Сумароков, А. М.* Проблемы и перспективы биологической переработки органических отходов / А. М. Сумароков, И. П. Карпец // Тез. докл. участников 2-

го международного конгресса «Биоконверсия органических отходов народного хозяйства и охрана окружающей среды». – Ивано-Франковск, 1992. – С. 93–95.

9. Емельянова, И. М. Субстраты для получения биогазуса / И. М. Емельянова, Н. А. Прокопович // Земледелие. – 2000. – № 3 – С. 28–29

10. Патраченко, Е. А. Научно-технические проблемы по интенсификации развития вермикозия / Е. А. Патраченко, С. Г. Деревенский // Тез. докл. участников 2-го международного конгресса «Биоконверсия органических отходов народного хозяйства и охрана окружающей среды». – Ивано-Франковск, 1992. – С. 23–27

11. Корсунова, Т. М. Устойчивое сельское хозяйство: учебное пособие / Т. М. Корсунова, Э. Г. Имескенова. – Издательство «Лань»: электрон.-библиотеч. система. – Санкт Петербург, 2010. – URL : <https://e.lanbook.com/book/113920> (дата обращения: 27.02.2025). – Режим доступа: по подписке.

12. Джигбгашвили, У. Надежный путь восстановления плодородия почв / У. Джигбгашвили // Дождевые черви и плодородие почв: материалы 1-й международной конференции. – Владимир, 2002. – С. 130–132.

13. Сельскохозяйственные машины: учебник / Ю. И. Воронов [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1982. – 392 с.

14. Патент № 2050341 Российская Федерация, МКИ С 05 F 3//06, А 01 К 67//033. Устройство для переработки органического субстрата в биогазус / Сташевский И. И.; заявитель и патентообладатель И. И. Сташевский. – № 93035670/15: заявл. 16.07.93; опубл. 20.12.95. – 7 с.

15. Патент № 2049082 Российская Федерация, МКИ С 05 F 7/00, А 01 К 67//033. Способ производства органических удобрений / Камышников И. Г., Папулов В. И., Папулов А. В., Камышников О. Г., Камышников А. Г.; заявители и патентообладатели И. Г. Камышников, В. И. Папулов, А. В. Папулов, О. Г. Камышников, А. Г. Камышников. – № 93031387/15; заявл. 27.05.93; опубл. 27.11.95 – 5 с.

16. Гумпылова Д. Б. Ускоренная технология выделения червей из биогумуса / Гумпылова Д. Б., Корсунова Т. М. // Дождевые черви и плодородие почв: материалы 1-й международной конференции. – Владимир, 2002. – С. 59-61.

17. Патент 155933 Российская Федерация, МПК С05 F 3/06 (2006.01). Мобильное устройство для переработки органических отходов / Ковшов С. В., Трушко О.В., Никулин А. Н., Ильинова А. А., Виленская А. В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет "Горный"». – № 2014151579/13: заявл. 18.12.2014: опубл. 20.10.2015, Бюл. № 29. – 12 с.

18. Патент № 194518 Российская Федерация, СПК С05F 17/02 (2019.08). Биогенный модуль для комплексной переработки органических отходов в условиях Арктики / Трушко О. В., Ковшов С. В., Виленская А. В.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2019124897; заявл. 05.08.2019; опубл. 12.12.2019, Бюл. № 35. – 4 с.

19. Патент № 185289 Российская Федерация, СПК С05F 3/06 (2006.01). Мобильное устройство для переработки органических отходов / Трушко О. В., Ковшов С. В., Виленская А. В.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2018126415: заявл. 17.07.2018: опубл. 29.11.2018, Бюл. № 34. – 7 с.

20. Патент № 171474 Российская Федерация, МПК С05F 3/06 (2006.01). Мобильное устройство для получения органического удобрения / Трушко О. В., Ковшов С. В., Ковшов В. П., Сидоренко А. А. – № 2016136737; заявл. 13.09.2016; опубл. 01.06.2017. – 12 с.

21. Патент № 2264372 Российская Федерация, МПК С05F 17/02 (2000.01) С05F 11/06 (2000.01) С05F 3/06 (2000.01). Вермикомпостер для комплектной очистной установки / Куликов Н. И., Куликова Е. Н., Кондратьева Т. Д., Судьин А. И.; патентообладатель Н. И. Куликов. – № 2003137877/15; заявл. 26.12.2003; опубл. 20.11.2005, Бюл. № 32. – 3 с.

22. Патент № 112189 Российская Федерация, МПК С05F 17/02 (2006.01). Устройство для переработки биоотходов с использованием вермикультуры /

Абрамов Е. В., Абрамов Р. Е.; патентообладатель Е. В. Абрамов. – № 2011131351/13; заявл. 26.07.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 11 с.

23. Патент № 2144015 Российская Федерация, МПК С05F 17/02 (2000.01) С05F 3/06 (2000.01). Технологическая линия для переработки биологических отходов / Гаврилин В. П., Чурносков А. В., Гаврилин Н. В. ; заявители и патентообладатели В. П. Гаврилин, А. В. Чурносков, Н. В. Гаврилин. – № 98114643/13; заявл. 27.07.1998; опубл. 10.01.2000. – 6 с.

24. Патент № 2244698 Российская Федерация, МПК С05F 3/06 (2000.01) А01К 67/033 (2000.01). Устройство и способ компостирования с использованием вермикультуры / Лужков Ю. М.; патентообладатель Ю. М. Лужков. – № 2004101370/12; заявл. 21.01.2004; опубл. 20.01.2005, Бюл. № 2. – 13 с.

25. Патент № 2101267 Российская Федерация, МПК С05F 11/00 (1995.01). Способ получения биогумуса и устройство для его осуществления / Синельников В. П., Каманчаджян П. А.; заявители и патентообладатели В. П. Синельников, П. А. Каманчаджян. – № 96106624/13; заявл. 04.04.1996; опубл. 10.01.1998. – 5 с.

26. Патент № 94036427 Российская Федерация, МПК А01К 67/00 (1995.01) А01К 67/033 (1995.01) А01К 67/04 (1995.01). Модуль для производства биологического корма и вермикомпоста / Мухачев В. И., Хлебников И. К., Ваганов С. П., Ащеулов А. А., Васильев П. И. – № 94036427/15; заявл. 29.09.1994; опубл. 27.06.1996. – 8 с.

27. Патент № 2108998 Российская Федерация, МПК С05F 11/00 (1995.01) С05F 11/06 (1995.01) С05F 3/00 (1995.01) С05F 3/06 (1995.01) А01К 67/033 (1995.01). Способ переработки органических отходов в биогумус и установка для его осуществления / Колесов К. Н. – № 96123447/13; заявл. 05.12.1996; опубл. 20.04.1998 – 9 с.

28. Патент № 2227129 Российская Федерация, МПК С05F 3/00 (2000.01). Способ приготовления органоминеральной удобрительной смеси / Головин В. Л., Дрыганов В. Н., Зверев А. В.; заявитель и патентообладатель государственное предприятие «Дальневосточный научно-исследовательский институт

гидротехники и мелиорации». – № 2001133142/13; заявл. 06.12.2001; опубл. 10.07.2003 – 8 с.

29. Патент № 2018224 Российская Федерация, МПК А01К 67/033 (1990.01) С05F 3/06 (1990.01). Устройство для выращивания вермикультуры с получением биогумуса / Кащи П. З., Дереневский С. П., Петраченко Е. А., Ким А. Н. ; заявители и патентообладатели П. З. Кащи, С. П. Дереневский, Е. А. Петраченко, А. Н. Ким. – № 5013160/15; заявл. 19.11.1991; опубл. 30.08.1994. – 6 с.

30. Патент № 2054405 Российская Федерация, МПК С05F 3/06 (1995.01) А01К 67/033 (1995.01). Установка И. И. Сташевского для поточной переработки органического субстрата / Сташевский И. И. ; заявитель и патентообладатель И. И. Сташевский. – № 92 92006140 ; заявл. 13.11.1992 ; опубл. 20.02.1996. – 2 с.

31. *Горячкин, В. П.* Основы построения сельскохозяйственных машин и орудий : сб. тр : в 2 т. / В. П. Горячкин // Тр. опытных учреждений Московского сельскохозяйственного института. Машиноиспытательная станция. – М., 1914. – Т. 2.

32. *Горячкин, В. П.* Испытание сельскохозяйственных машин и орудий при Московском сельскохозяйственном институте в 1911 г. : сб. ст. / В. П. Горячкин. – СПб., 1913. – 140 с.

33. *Домбровский, Н. Г.* Сопротивление грунтов копанью ковшом экскаватора / Н. Г. Домбровский // Механизация строительства. – 1940. – № 7.

34. *Резник, Н. Е.* Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник. – М. : Машиностроение, 1975. – 311 с.

35. *Зеленин, А. Н.* Основы разрушения грунтов механическими способами : [монография] / А. Н. Зеленин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 376 с.

36. *Азаренко, В. В.* Моделирование процесса взаимодействия ножа фрезы с обрабатываемой средой / В. В. Азаренко // Математическое моделирование сельскохозяйственных объектов – основа проектирования технологий и машин XXI века : матер. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (27–28 февраля 2001 г.) / Белорусский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. – Минск, 2001. – С. 43–48.

37. *Далин, А. Д.* Ротационные и грунтообрабатывающие и землеобрабатывающие машины / А. Д. Далин. – М. : Машгиз, 1950. – 120 с.
38. *Павлов, Н. В.* Исследование энергоемкости процесса погрузки органических удобрений погрузчиками периодического и непрерывного действия: дис. ... канд. техн. наук / Павлов Н. В. – Рига, 1969. – 215 с.
39. *Павлов, П. И.* Научно-технические решения проблемы ресурсосбережения при использовании навозопогрузчиков непрерывного действия : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Павлов Павел Иванович. – Саратов, 2002. – 441 с.
40. *Павлов, П. И.* Технологическая схема и машина для удаления санитарного слоя грунта из теплиц / П. И. Павлов, А. В. Левченко // Актуальные проблемы и перспективы инновационной агроэкономики : сборник статей Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции. – Саратов, 2020. – С. 261–266.
41. *Гвоздева, Л. В.* Повышение эффективности погрузки навоза погрузчиком непрерывного действия и обоснование параметров элементно-цепного питателя : дис. ... канд. техн. наук / Гвоздева Лариса Владимировна. – Саратов, 2002. – 156 с.
42. Влияние конструктивных и режимных параметров на силовые характеристики машины для удаления и погрузки тепличного грунта / А. О. Везиров [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. – 2021. – № 4 (40). – С. 53–58.
43. *Мацеруро, М. Е.* Механизация мелиоративных и культуртехнических работ / М. Е. Мацеруро. – М.: Знание, 1952.
44. Пат. № 208013 Российская Федерация, СПК С05F 3/06 (2021.08). Устройство для производства биогумуса / Макаров С. А., Данилин А. В., Шишкин И. В., Денисов Р. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2021119289; заявл. 01.07.2021; опубл. 29.11.2021, Бюл. № 34. – 5 с.
45. Tagrm: сайт / Производитель сельскохозяйственной техники. – Гуанси, Китай, 2010. – URL : <http://ru.compostturners.net/news/how-to-adjust-the-carbon-to-nitrogen-ratio/> (дата обращения : 13.03.2025).
46. Прикладная экиобиотехнология : в 2 т. / А. Е. Кузнецов [и др.]. – 5-е изд. – М.: Лаборатория знаний, 2024. – Т. 2. – 504 с.

47. Agromania: сайт.– М., 2024. – URL : <https://agromania.org/vermikompostirovanie-chervi-dlya-pererabotki-otxodov/> (дата обращения : 14.03.2025).

48. Море зелени: сайт. – М., 2025. – URL: <https://morezeleni.ru/Inform/vermikompostirovanie/?srsltid=AfmBOooLUImFSSmCanLd9R6rHrwQtNjaFGAdsoM8xRb0Jn-W54Jqw1cD> (дата обращения : 14.03.2025).

49. Данилин, А. В. Совершенствование технологии производства вермикомпоста с разработкой и обоснованием параметров измельчающего устройства: дис. ... канд. техн. наук / Данилин Андрей Владимирович. – Саратов, 2006. – 180 с.

50. Якушев, А. В. Микробиологическая характеристика вермикомпостов: дис. канд. биол. наук / А. В. Якушев. - Ростов-на-Дону, 2009 – 118 с.

51. Данилин, А. В. Совершенствование технологии производства вермикомпоста с разработкой и обоснованием параметров измельчающего устройства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Данилин Андрей Владимирович. – Саратов, 2006. – 28 с.

52. Клейн, Г. К. Строительная механика сыпучих тел / Г. К. Клейн. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.

53. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматгиз, 1960. – 243 с.

54. Вайнберг, Д. В. Расчет пластин / Д. В. Вайнберг, Е. Д. Вайнберг. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Киев: Будівельник, 1970. – 437 с.

55. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – 2-е изд., стер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.

56. Гоц, А. Н. Численные методы расчета в энергомашиностроении: учебное пособие: в 2 ч. / А. Н. Гоц; Владим. гос. ун-т им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – 2-е изд., испр. и доп. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2013. – Ч. 2 – 182 с.

57. Строительная механика машин. Поперечный изгиб пластин: учебное пособие / Т. Б. Гоцелюк [и др.]. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 91 с.

58. *Резник, Н. Е.* Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.

59. Исследование взаимодействия рабочего органа устройства с вермикомпостом / Е. Е. Демин [и др.] // Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки : материалы Региональной науч.-технич. конф., посвящ. 110-летию Вавиловского университета. Саратов, 13–17 февраля 2023 г. Вып. 1. – Саратов: Амирит, 2023. – С. 16–19. – EDN MCUWYD.

60. *Сакевич, В. Н.* Механика деформирования и разрушения: курс лекций для студентов специальности 1-55 01 03 «Компьютерная мехатроника» / В. Н. Сакевич, Г. Н. Федосеев. – Витебск: Витебский гос. технологический ун-т, 2020. – 172 с. – ISBN 978-985-481-651-7. – EDN CDMMUV.

61. *Левитская, О. Н.* Курс теории механизмов и машин / О. Н. Левитская, Н. И. Левитский. – М.: Высшая школа, 1985. – 279 с.

62. *Чернова, Е. Н.* Теория очистки подвижной ленты клетки для содержания телят скребком, очищающим / Е. Н. Чернова, А. С. Старцев, Г. Е. Шардина // Научное обозрение. – 2015. – № 16. – С. 44–54. EDN VWGIEN.

63. *Дубинин, В. Ф.* Физико-механические и перегрузочные свойства сельскохозяйственных грузов / В. Ф. Дубинин, П. И. Павлов. – Саратов, 1996. – 100 с.

64. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. – М.: Колос, 1970. – 361 с.

65. *Ковалев, Н. Г.* Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства) / Н. Г. Ковалев, Г. А. Кайлис. – М.: ИК «Родник», 1988. – 208 с.

66. *Дьяченко, Г. Н.* Почва как объект и результат механической обработки: учебное пособие / Г. Н. Дьяченко, Р. Соучек. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1986. – 94 с.

67. *Веденяпин, Г. В.* Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – М.: Колос, 1967. – 159 с.

68. *Амельяни, А. Г.* Исследование рабочего процесса и обоснование параметров бункерного раздатчика для порционной и непрерывной выдачи кормов репродукторному поголовью свиней: дис. канд. ... техн. наук / Амельянц Аркадий Григорьевич. – Саратов, 1980. – 178 с.

69. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Аленин, П. М. Рошин. – М.; Л.: Колос, 1966. – 134 с.

70. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер. – М.: Наука, 1976. – 297 с.

71. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. – Ч. 2. – Нормативно-справочный материал. – М., 1998. – 251 с.

72. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений / Госагропром УССР. – Киев: Урожай, 1986. – 117 с.

73. Прикладная экобиотехнология : в 2 т. / А. Е. Кузнецов [и др.]. – 5-е изд. – М.: Лаборатория знаний, 2024. – Т. 1. – 640 с.

74. Использование технологий вермикомпостирования для утилизации органических отходов / А. А. Коровин [и др.]. // Биотехнология и микробиология. – Томск: Томский гос. ун-т, 2024. – С. 1–21.

75. Биологические технологии утилизации отходов сельскохозяйственного производства и перерабатывающей промышленности // ГОУ ВПО «Марийский государственный университет». Аграрно-технологический институт: сайт. – URL : <https://present5.com/gouvpo-marijskij-gosudarstvennyj-universitet-agrarno-technologicheskij-institut-kafedra/> (дата обращения : 06.08.2025).

76. ГОСТ Р 56004-2014. Удобрения органические. Вермикомпосты. Технические условия: дата введения 01.07.2015. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.

77. АгроЭкомиссия. Цифровая платформа знаний: сайт. – М., 2023. – URL : <https://agriecomission.com/base/vermikultivirovanie> (дата обращения : 06.08.2025).

78. Вермикультивирование как биотехнология утилизации органических отходов / Мишина М. Н. // CyberLeninka : Научная электронная библиотека : сайт.

– URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/vermikultivirovanie-kak-biotehnologiya-utilizatsii-organicheskikh-othodov> (дата обращения : 08.08.2025).

79. Эффективность использования различных субстратов при вермикультивировании / Лящев А. А. // CyberLeninka: Научная электронная библиотека : сайт. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-ispolzovaniya-razlichnyh-substratov-pri-vermikultivirovanii> (дата обращения: 08.08.2025).

80. Технология использования биогумуса при регенерации почвы / Шарипов Б. Ш., Бекназаров Х. С., Ширинов Ш. Д., // CyberLeninka: Научная электронная библиотека : сайт. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-ispolzovaniya-biogumusa-pri-regeneratsii-pochvy> (дата обращения: 10.05.2025)

81. *Андреев, В. А.* Использование навоза свиней на удобрение / В. А. Андреев, М. Н. Новиков, С. М. Лукин. – М.: Росагропромиздат, 1990. – 94 с.

82. *Русанов, А. М.* Факторы изменения гумуса почв степной зоны / А. М. Русанов, Т. С. Бондаренко // Тез. докл. участников 2-го международного конгресса «Блокконверсия органических отходов народного хозяйства и охрана окружающей среды». – Ивано-Франковск, 1992.

83. Эффективность действия вермикомпоста на агробиологические свойства почвы и урожайность полевых культур / В. А. Касатиков [и др.]. – Ивано-Франковск, 1992. – С. 27–28.

84. Тучак, В. Н. Вермикомпостирование в климатических условиях Сибири / В. Н. Тучак. – Ивано-Франковск, 1992 – С. 29–31.

85. *Ясенецкий, В. А.* Механизированная технология вермикультивирования для переработки навоза / В. А. Ясенецкий // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – № 4. – С. 28–29.

86. *Appelhof, M.* Worms Eat My Garbage : How to Set Up and Maintain a Worm Composting System / М. Appelhof, J. Olszewski.: Flower Press, 2017. – 214 p.

87. Инженерная экология. Переработка органических отходов : учебное пособие / А. Н. Иванкин [и др.]. – М. : Изд-во Московского гос. ун-та леса, 2016. – 401 с.

88. Влияние длительного использования вермикомпоста / Мешков И. И., Ториков В. Е., Волков А. В. // CyberLeninka : Научная электронная библиотека :

сайт. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-dlitelnogo-ispolzovaniya-vermikomposta> (дата обращения : 17.06.2025).

89. Математические методы при разработке и управлении качеством материалов специального назначения / Данилов А. М., Гарькина И. А., Королева О. В., Смирнов В. А. // CyberLeninka: Научная электронная библиотека: сайт. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-metody-pri-razrabotke-i-upravlenii-kachestvom-materialov-spetsialnogo-naznacheniya> (дата обращения: 18.08.2025).

90. Романенко, С. В. Сопротивление материалов: учебное пособие / С. В. Романенко. – 2-е изд. – М.: Проспект, 2022. – 199 с.

91. Щурин, К. В. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие / К. В. Щурин, Е. К. Волкова. – 2-е изд., стереотипное. – М.: Лань, 2025. – 333 с.

92. Бочкарев, С. В. Планирование и обработка результатов эксперимента / С. В. Бочкарев, Т. В. Васильева, А. Л. Галиновский. – Старый Оскол: Тонкие Научные Технологии, 2024. – 508 с.

93. Практикум по организации и управлению производством на сельскохозяйственных предприятиях / В. Т. Водяников [и др.] ; под. ред. В. Т. Водяникова. – М.: КолосС, 2005. – 448 с.

94. Вермикомпостирование как решение экологической проблемы утилизации отходов животноводства / Суханова И. М., Шарафеева Ф. Г., Газизов Р. Р.; Биккинина Л. М.-Х., Ильясов М. М. // CyberLeninka : Научная электронная библиотека : сайт. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/vermikompostirovanie-kak-reshenie-ekologicheskoy-problemy-utilizatsii-othodov-zhivotnovodstva> (дата обращения : 03.04.2025).

95. Кольга, Д. Ф. Технология производства вермикомпостов / Д. Ф. Кольга, С. А. Костюкевич, Ф. И. Назаров // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства. – Минск : Белорусский гос. аграрный технический ун-т, 2017. – С. 172–174.

96. Влияние дождевых червей разных морфо-экологических групп на аккумуляцию углерода в лесных почвах / Гераськина А. П. // CyberLeninka : Научная электронная библиотека : сайт. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-dozhdevyh-chervey-raznyh-morfo->

ekologicheskikh-grupp-na-akkumulyatsiyu-ugleroda-v-lesnyh-pochvah/viewer (дата обращения : 09.04.2025).

97. Управление отходами. Механобиологическая переработка твердых бытовых отходов. Компостирование и вермикомпостирование органических отходов : [монография] / Я. И. Вайсман [и др.] ; под ред. Я. И. Вайсмана. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 225 с.

98. Перспективы развития вермикультивирования в сельском хозяйстве / Н. В. Спевак [и др.] // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора А. Г. Рыбалко. – Саратов : Центр социальных агроинноваций СГАУ, 2016. – С. 103–105.

99. Кощачев, А. Г. Биотехнология вермикультивирования органических отходов / А. Г. Кощачев, О. В. Кощачев, М. А. Елисеев // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – № 95. – С. 1–17.

100. Пат. № 2546893 Российская Федерация, МПК C05F 11/00 (2006.01) A01C 3/06 (2006.01). Способ производства вермикомпоста и устройство для его осуществления / Спевак Н. В., Спевак В. Я., Медведев Р. М., Лифатов В. В., Никульникова А. А., Шарапова И. Г., Моисеев Е. В. ; патентообладатели Спевак Н. В., Спевак В. Я. – № 2014110323/13 ; заявл. 18.03.2014 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. – 11 с.

101. Разработка технологии производства биогумуса в установке непрерывного действия / Выгузова М. А. // CyberLeninka : Научная электронная библиотека : сайт. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologii-proizvodstva-biogumusa-v-ustanovke-nepneryvnogo-deystviya> (дата обращения : 09.06.2025).

102. Кольга, Д. Ф. Переработка навоза в экологически безопасные органические удобрения / Д. Ф. Кольга, А. С. Васько. – Минск: БГАТУ, 2017. – 128 с.

103. Вермикультура: переработка органической фракции отходов / Титов И. Н. // Научная электронная библиотека: сайт. – URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15602749> (дата обращения : 14.01.2025).

104. Мацепуро, М. Е. Основы земледельческой механики / М. Е. Мацепуро. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Наука и техника, 1981. – 371 с.

105. *Серая, Т. М.* Гумус – важнейший страж плодородия почв / Т. М. Серая, Е. Н. Богатырева // Вермикомпостирование и вермикультивирование как основа экологического земледелия в 20 веке : достижения, проблемы перспективы : матер. науч.-практ. конф. с междунар. участием (10–14 июня 2013). – Минск, 2013. – С. 12–18.

106. Сельскохозяйственная экология (в аспекте устойчивого развития) : учебное пособие / А. Н. Есаулко [и др.] ; Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь, 2014. – 92 с. – Текст : электронный. – Режим доступа : <https://znanium.com/catalog/product/514624>.

107. Репродуктивные характеристики популяции *Eisenia fetida* (Sav.) в разные сезоны года при их культивировании в закрытых помещениях / Охотников С. И. // Научная электронная библиотека: сайт. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/reproduktivnye-harakteristiki-populyatsii-eisenia-fetida-sav-v-raznye-sezony-goda-pri-ih-kultivirovanii-v-zakrytyh-pomescheniyah> (дата обращения : 11.03.2025).

108. *Петрова, Г. В.* Эколого-агрохимические и технологические основы производства и применения вермикомпостов в овощеводстве защищенного грунта: дис. ... д-ра с-х наук: 06.01.04 / Петрова Галина Васильевна. – Оренбург, 2002. – 338 с.

109. *Шишкин, И. В.* Определение движущей силы при работе трапециевидного ножа в слое вермикомпоста / И. В. Шишкин // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 6. – С. 134–138.

110. *Abbasi S.A., Hussain N., Tauseef S.M., Abbasi T.* A novel FLippable Units Vermireactor Train System — FLUVTS — for rapidly vermicomposting paper waste to an organic fertilizer // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 198. P. 917–930.

111. *Ahmed M., Ahmad S., Fayyaz-ul-Hassan, Qadir G., Hayat R., Shaheen F.A., Raza M.A.* Innovative Processes and Technologies for Nutrient Recovery from Wastes: A Comprehensive Review // Sustainability. 2019. Vol. 11, № 18. P. 2–22.

112. *Alshehrei F., Ameen F.* Vermicomposting: A management tool to mitigate solid waste // Saudi Journal of Biological Sciences. 2021. Vol. 28, № 6. P. 3284–3293.

113. *Enebe M.C., Erasmus M.* Vermicomposting technology - A perspective on vermicompost production technologies, limitations and prospects // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 345. P. 3–17

114. *Flores-Solórzano S.B., Huerta-Lwanga E., Cuevas-González R., Guillén-Navarro K.* Optimal conditions to produce extracts of compost and vermicompost from oil palm and coffee pulp wastes // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022. Vol. 24. P. 801–810.

115. *Gusain R., Suthar S.* Vermicomposting of invasive weed *Ageratum conyzoides*: Assessment of nutrient mineralization, enzymatic activities, and microbial properties // *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 312. P. 25-41.

116. *Hanc A., Chadimova Z.* Nutrient recovery from apple pomace waste by vermicomposting technology // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 168. P. 240–244.

117. *Lazcano C., Domínguez J.* The use of vermicompost in sustainable agriculture: impact on plant growth and soil fertility // *Soil Nutrients* / ed. by M. Miransari. — 2011. — P. 23–35.

118. *Olle M.* Review: Vermicompost, its importance and benefit in agriculture // *Agraarteadus*. 2019. Vol. 30, № 2. P. 93–98.

119. *Singh M. K.* Handbook on Vermicomposting: Requirements, Methods, Advantages and Applications / M.K. Singh. — Hamburg : Anchor Academic Publishing, 2014. — 142 p.

120. *Yang J., Lv B., Zhang J., Xing M.* Insight into the roles of earthworm in vermicomposting of sewage sludge by determining the water-extracts through chemical and spectroscopic methods // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 154. P. 94–100.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 208013

## Устройство для производства биогумуса

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Авторы: *Макаров Сергей Анатольевич (RU), Данилин Андрей Владимирович (RU), Шишкин Игорь Валерьевич (RU), Денисов Роман Анатольевич (RU)*

Заявка № 2021119289

Приоритет полезной модели 01 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 29 ноября 2021 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 01 июля 2031 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 0x02A5CF8C09B1A0FB9A40A2F08092E9A118  
Владелец, **Ивлиев Григорий Петрович**  
Действителен с 20.01.2021 по 15.01.2035

*Г.П. Ивлиев*



26.09.2022, 09:02

ПМ №208013

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **208 013** (13) **U1**

(51) МПК  
**C05F 3/06 (2006.01)**  
 (52) СПК  
**C05F 3/06 (2021.08)**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

Статус: может прекратить свое действие (последнее изменение статуса: 21.12.2021)  
 Пошлина: Подлежит уплате 1 год действия патента в срок с 20.10.2021 по 20.12.2022 по п. 9  
 Положения о пошлинах

<p>(21)(22) Заявка: <a href="#">2021119289</a>, 01.07.2021</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 01.07.2021</p> <p>Дата регистрации: 29.11.2021</p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 01.07.2021</p> <p>(45) Опубликовано: <a href="#">29.11.2021</a> Бюл. № <a href="#">34</a></p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 9102574 B1, 11.08.2015. MD 632 Z, 31.12.2013. AU 2020250282 A1, 29.04.2021. RU 171474 U1, 01.06.2017.</p> <p>Адрес для переписки: 410012, Саратовская обл., г. Саратов, п.л. Театральная, 1, ФГБОУ ВО "Саратовский ГАУ", патентный отдел</p>	<p>(72) Автор(ы): Макаров Сергей Анатольевич (RU), Данилин Андрей Владимирович (RU), Шишкин Игорь Валерьевич (RU), Денисов Роман Анатольевич (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)</p>
--	--

**(54) Устройство для производства биогумуса****(57) Реферат:**

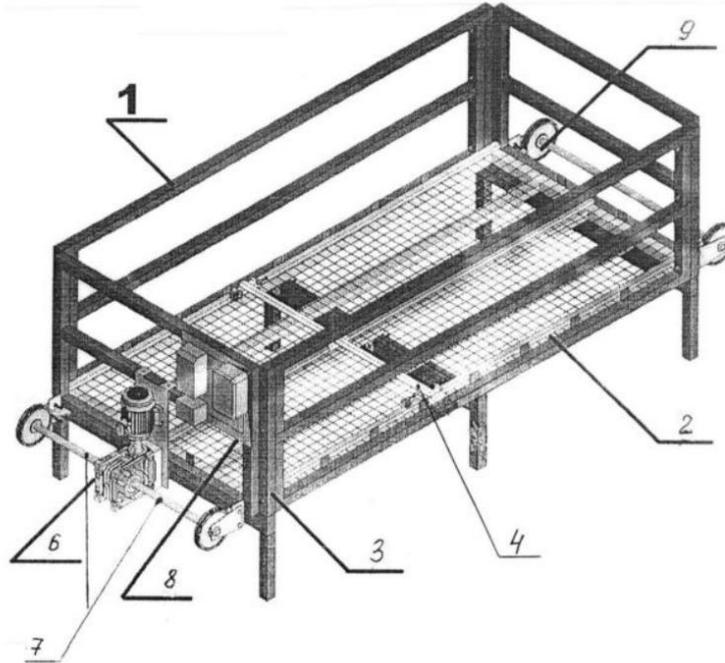
Полезная модель относится к сельскому хозяйству, а именно к устройствам для получения экологически чистого органического удобрения-биогумуса на основе переработки органических отходов растительного и животного происхождения с помощью вермиккультуры.

Поставленная в полезной модели задача решается в устройстве для производства биогумуса, состоящем из секции, нижнее основание которой представляет перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, отличающимся тем, что стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами, кроме того, на нижнем основании установлен нож, выполненный сварным из лезвия и направляющих, кроме того, механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора, в который вмонтированы два вала со шкивами, натягивающими трос, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего

26.09.2022, 09:02

ПМ №208013

устройства, причем на задней стенке секции закреплена ось с тросами.



Фиг. 1

Полезная модель относится к сельскому хозяйству, а именно к устройствам для получения экологически чистого органического удобрения-биогумуса на основе переработки органических отходов растительного и животного происхождения с помощью вермикультуры.

Известно мобильное устройство для получения органического удобрения (патент РФ на ПМ №171474, МПК С05F3/06, опубл.01.06.2017, бюл. №16), состоящее из секций, поддонов и боковых стенок с отверстиями для аэрации на уровне среднего поддона, поддоны установлены вертикально относительно друг друга, верхний поддон имеет крышку в виде жесткой кровли с ручкой для открывания и выдвигающееся с помощью рукоятки в бок дно, в боковых стенках среднего поддона выполнены равноудаленные отверстия, и продернут смешительный шнур, нижнее основание представляет собой перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, нижний поддон размещен на выдвигающемся с помощью рукоятки основании, поддоны и боковые стенки выполнены из темного металлопластика и образуют модуль из трех частей, в нижней части задней стенки на уровне нижнего поддона располагаются колеса, отличающееся тем, что в среднем поддоне выполнены боковые форсунки, а на задней стенке верхнего поддона установлен бак с водой для ее распыления.

Недостатком известной конструкции является отсутствие процесса механизации и преобладание ручного труда.

Технической задачей предлагаемой конструкции является механизация процесса производства биогумуса.

Поставленная задача решается в устройстве для производства биогумуса, состоящем из секции, нижнее основание которой представляет перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, отличающемся тем, что стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами, кроме того на нижнем основании установлен нож, выполненный сварным из лезвия и направляющих, кроме того механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора, в который вмонтированы два вала со шкивами, натягивающими трос, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства, причем на задней стенке секции закреплена ось с тросами.

Техническим результатом применения полезной модели является механизация процесса производства биогумуса, заключающаяся в том, что удаление готового слоя биогумуса происходит с применением ножа, работающего от системы мотор-редуктор.

Предлагаемое устройство иллюстрируется следующими фигурами. На фиг. 1 представлен общий вид устройства, на фиг. 2 - нож.

26.09.2022, 09:02

ПМ №208013

Устройство для производства биогумуса содержит секцию 1, нижнее основание 2, которое представляет перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами 3, кроме того на нижнем основании 2 установлен нож, выполненный сварным из лезвия 4 и направляющих 5, кроме того механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора 6, в который вмонтированы два вала 7 со шкивами, натягивающими трос, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства 8. Причем на задней стенке секции закреплена ось 9 с тросами.

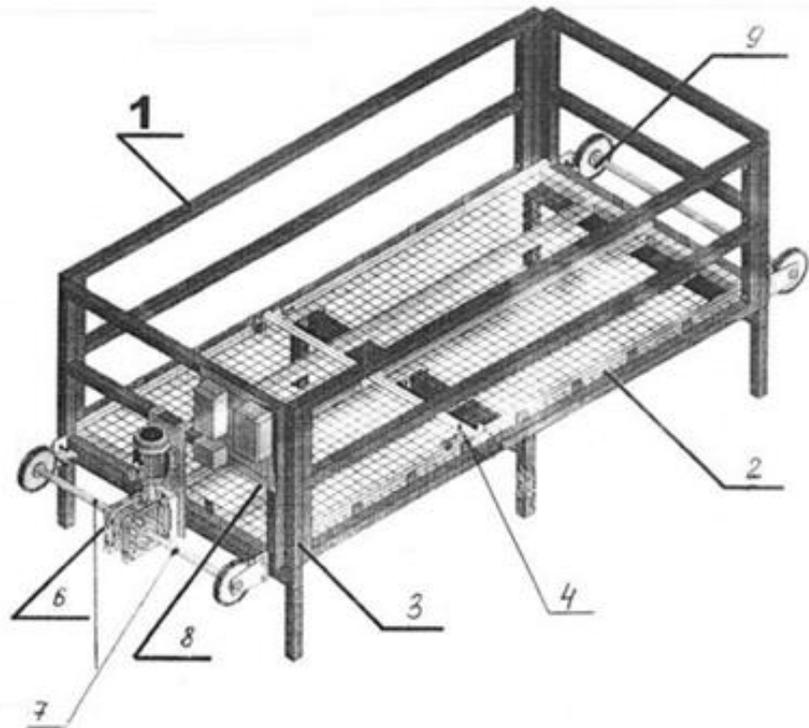
Работает устройство следующим образом. В секцию 1 загружается субстрат, состоящий из одной части перепревших опилок, сена или соломы, древесной листвы; одной части органических отходов: полежавшего коровьего навоза или птичьего помета, измельченных овощных очисток, листьев, ботвы и других компонентов и песка в количестве 5% от общего количества компоста и прошедший процесс компостирования в течении К) дней, во время которого смесь хорошо прогревают на солнце или добавляют в нее торф с известью. Готовность субстрата можно определить запустив в компост несколько червей, которые должны зарыться вглубь. На готовый субстрат выкладывают (вермиккультуру) червей. Для получения биогумуса в помещении, где установлено устройство, поддерживают определенную температуру и влажность субстрата. При готовности биогумуса верхний слой его в секции 1 срезается ножом, выполненным сварным из лезвия 4 и направляющих 5, который приводится в движение с помощью мотор-редуктора 6, в который вмонтированы два вала 7 со шкивами, натягивающими трос и ось 9 с тросами, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства 8. Далее процесс повторяется.

#### Формула полезной модели

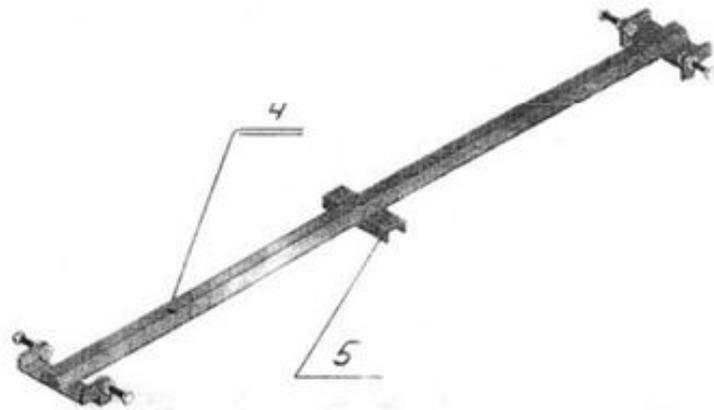
Устройство для производства биогумуса, содержащее секцию, нижнее основание которой представляет собой перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами, кроме того, на нижнем основании установлен нож, выполненный сварным из лезвия и направляющих, а механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора, в который вмонтированы два вала со шкивами, натягивающими трос, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства, причем на задней стенке секции закреплена ось с тросами.

26.09.2022, 09:02

ПМ №208013



Фиг. 1



Фиг. 2

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 212304****Устройство для производства биогумуса**

Патентообладатель: **Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)**

Авторы: **Азизов Ирек Раилевич (RU), Шишкин Игорь Валерьевич (RU), Базганова Виктория Андреевна (RU), Макаров Сергей Анатольевич (RU), Данилин Андрей Владимирович (RU), Люляков Иван Викторович (RU)**

Заявка № **2022107691**Приоритет полезной модели **22 марта 2022 г.**Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **15 июля 2022 г.**Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **22 марта 2032 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 68b80077e14e4010a94e8bd24145d5c7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 2.03.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*

26.09.2022, 08:56

ПМ №212304

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **212 304** (13) **U1**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(51) МПК  
[C05F 3/06 \(2006.01\)](#)  
[C05F 3/00 \(2006.01\)](#)  
(52) СПК  
[C05F 3/06 \(2022.05\)](#)  
[C05F 3/00 \(2022.05\)](#)**(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**Статус: может прекратить свое действие (последнее изменение статуса: 20.07.2022)  
Пошлина: Подлежит уплате 1 год действия патента в срок с 19.05.2022 по 19.07.2023 по п. 9  
Положения о пошлинах(21)(22) Заявка: [2022107691](#), 22.03.2022(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
22.03.2022Дата регистрации:  
15.07.2022Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 22.03.2022(45) Опубликовано: [15.07.2022](#) Бюл. № 20(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 208013 U1, 29.11.2021. ЕА 12688  
В1, 30.12.2009. JP 2009245003 А, 22.10.2009.Адрес для переписки:  
410012, г. Саратов, Театральная пл., 1,  
ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, патентный  
отдел

(72) Автор(ы):

Азизов Ирек Раилевич (RU),  
Шишкин Игорь Валерьевич (RU),  
Базганова Виктория Андреевна (RU),  
Макаров Сергей Анатольевич (RU),  
Данилин Андрей Владимирович (RU),  
Люляков Иван Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Саратовский  
государственный аграрный университет  
имени Н.И. Вавилова" (RU)**(54) Устройство для производства биогумуса****(57) Реферат:**

Полезная модель относится к сельскому хозяйству, а именно к устройствам для получения экологически чистого органического удобрения - биогумуса - на основе переработки органических отходов растительного и животного происхождения с помощью вермиккультуры.

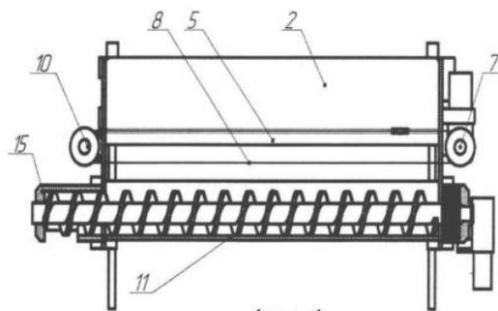
Поставленная в полезной модели задача решается в устройстве для производства биогумуса, содержащем секцию, нижнее основание которой представляет собой перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами, кроме того, на нижнем основании установлен нож, выполненный сварным из лезвия и направляющих, а механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора, в который вмонтированы два вала со шкивами, натягивающими трос, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства, причем на задней стенке секции закреплены оси с блоками.

Отличием от прототипа является то, что устройство содержит транспортирующие устройство шнекового типа, состоящее из корпуса в виде металлического короба W-образного сечения, на который вдоль конструкции устанавливаются два шнека, приводящиеся в движение через привод, в свою очередь, к приводу через муфту передается вращательный момент от мотор-редуктора, подключенного к управляющему устройству, кроме того, с противоположной стороны относительно привода смонтирован рукав транспортера, по которому осуществляется выгрузка

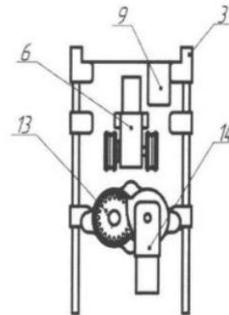
26.09.2022, 08:56

ПМ №212304

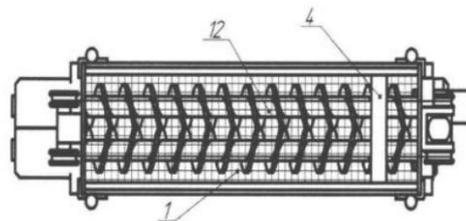
продукта.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Полезная модель относится к сельскому хозяйству, а именно к устройствам для получения экологически чистого органического удобрения - биогумуса - на основе переработки органических отходов растительного и животного происхождения с помощью вермикультуры.

Известно устройство для получения органического удобрения (патент РФ на ПМ №208013, МПК C05F 3/06 (2006.01), опубл. 29.11.21, бюл. №34), состоящее из секции, нижнее основание которой представляет перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, отличающееся тем, что стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами, кроме того, на нижнем основании установлен нож, выполненный сварным из лезвия и направляющих, кроме того, механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора, в который вмонтированы два вала со шкивами, натягивающими трос, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства, причем на задней стенке секции закреплена ось с тросами.

Недостатком известной конструкции является отсутствие механизированного процесса сбора и транспортировки готового продукта.

Технической задачей предлагаемой конструкции является механизация процесса транспортировки биогумуса.

Поставленная в полезной модели задача решается в устройстве для производства биогумуса, содержащем секцию, нижнее основание которой представляет собой перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами, кроме того, на нижнем основании установлен нож, выполненный сварным из лезвия и направляющих, а механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора, в который вмонтированы два вала со шкивами, натягивающими трос, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства, причем на задней стенке секции закреплены оси с блоками.

Отличием от прототипа является то, что устройство содержит транспортирующее устройство шнекового типа, состоящее из корпуса в виде металлического короба W-образного сечения, на который вдоль конструкции устанавливаются два шнека, приводящиеся в движение через привод, в свою очередь, к приводу через муфту передается вращательный момент от мотор-редуктора, подключенного к управляющему устройству, кроме того, с противоположной стороны относительно привода смонтирован рукав транспортера, по которому осуществляется выгрузка продукта.

Предлагаемое устройство иллюстрируется следующими фигурами. На фиг. 1 представлен вид спереди устройства; на фиг. 2 - вид сбоку; на фиг. 3 - вид сверху.

26.09.2022, 08:56

ПМ №212304

Предлагаемая полезная модель состоит из секции 1, нижнее основание которой представляет собой перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, стенки 2 и нижнее основание секции поддерживается опорами 3, кроме того, на нижнем основании установлен нож, выполненный сварным из лезвия 4 и направляющих 5, а механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора 6, в который вмонтированы два вала со шкивами 7, натягивающими трос 8, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства 9, причем на задней стенке секции закреплены оси с блоками 10, на которые набегают трос, приводящий в движение нож.

Кроме того, устройство содержит транспортирующее устройство шнекового типа, состоящее из корпуса 11 в виде металлического короба W-образного сечения, на который вдоль конструкции устанавливаются два шнека 12, приводящиеся в движение через привод 13, в свою очередь, к приводу через муфту передается вращательный момент от мотор-редуктора 14, подключенного к управляющему устройству 9, кроме того, с противоположной стороны относительно привода смонтирован рукав транспортера 15, по которому осуществляется выгрузка продукта.

Работает устройство следующим образом. На нижнее перфорированное основание секции 1 загружается субстрат, состоящий из одной части перепревших опилок, сена или соломы, древесной листвы; одной части органических отходов: полежащего коровьего навоза или птичьего помета, измельченных овощных очисток, листьев, ботвы и других компонентов, песка в количестве 5% от общего количества компоста, и прошедший процесс компостирования в течение нескольких дней, во время которого смесь хорошо прогревают на солнце или добавляют в нее торф с известью. На готовый субстрат выкладывают (вермиккультуру) червей. Готовность субстрата можно определить, запустив в компост несколько червей, которые должны зарыться вглубь. Для получения биогумуса в помещении, где установлено устройство, поддерживают определенную температуру и влажность субстрата. При готовности биогумуса нижний слой, лежащий на перфорированном основании секции 1, срезается ножом, выполненным сварным из лезвия 4 и направляющих 5, который приводится в движение с помощью мотор-редуктора 6, в который вмонтированы два вала со шкивами 7, натягивающими трос 8, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства 9. Срезанный продукт падает на W-образный корпус 11 транспортирующего механизма шнекового типа. Посредством крутящего момента, переданного от мотор редуктора 14 к приводу 13, шнеки 12 приводятся во вращение и производится транспортировка продукта через рукав транспортера 15, в заранее подготовленную емкость. Далее процесс повторяется.

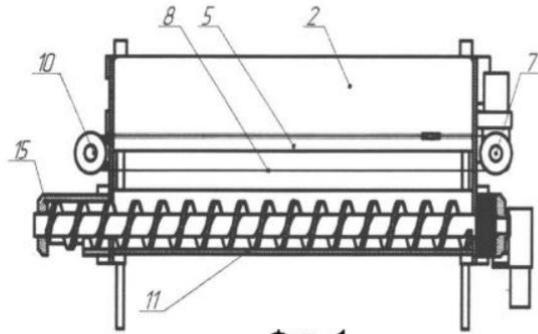
Техническим результатом применения полезной модели является механизация процесса производства биогумуса, заключающаяся в том, что удаление готового слоя биогумуса происходит с применением ножа, работающего от системы мотор-редуктор.

#### Формула полезной модели

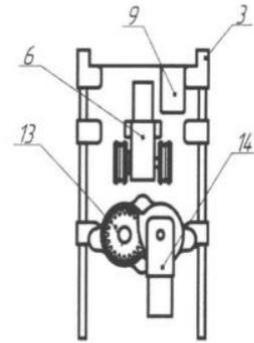
Устройство для производства биогумуса, содержащее секцию, нижнее основание которой представляет собой перфорированную поверхность с равноудаленными отверстиями, стенки и нижнее основание секции поддерживаются опорами, кроме того, на нижнем основании установлен нож, выполненный сварным из лезвия и направляющих, а механизм, приводящий в движение нож, состоит из мотора-редуктора, в который вмонтированы два вала со шкивами, натягивающими трос, при этом скорость прохождения ножа регулируется с помощью управляющего устройства, причем на задней стенке секции закреплены оси с тросами, отличающееся тем, что содержит транспортирующее устройство шнекового типа, состоящее из корпуса в виде металлического короба W-образного сечения, на который вдоль конструкции устанавливаются два шнека, приводящиеся в движение через привод, в свою очередь, к приводу через муфту передается вращательный момент от мотор-редуктора, подключенного к управляющему устройству, кроме того, с противоположной стороны относительно привода смонтирован рукав транспортера, по которому осуществляется выгрузка продукта.

26.09.2022, 08:56

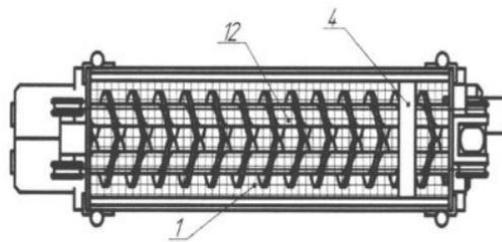
ПМ №212304



Фиг. 1



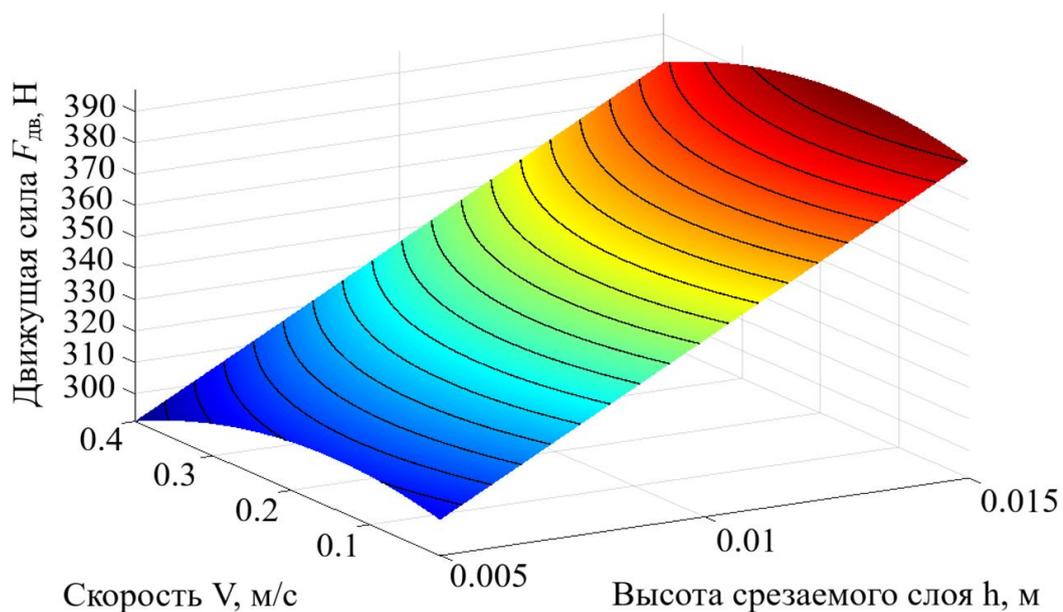
Фиг. 2



Фиг. 3

**Результаты обработки влияния скорости движения ножа  
и высоты срезаемого слоя на движущую силу**

№	Скорость движения $V$ , м/с	Высота слоя $h$ , м	Движущая сила $F_{дв}$ , Н
1	0,01	0,005	300,4
2	0,1	0,005	306,6
3	0,2	0,005	304,4
4	0,3	0,005	301,2
5	0,4	0,005	290,1
6	0,01	0,01	347,3
7	0,1	0,01	351,5
8	0,2	0,01	350,3
9	0,3	0,01	346,1
10	0,4	0,01	336
11	0,01	0,015	385,3
12	0,1	0,015	390,4
13	0,2	0,015	392,2
14	0,3	0,015	389
15	0,4	0,015	391,1

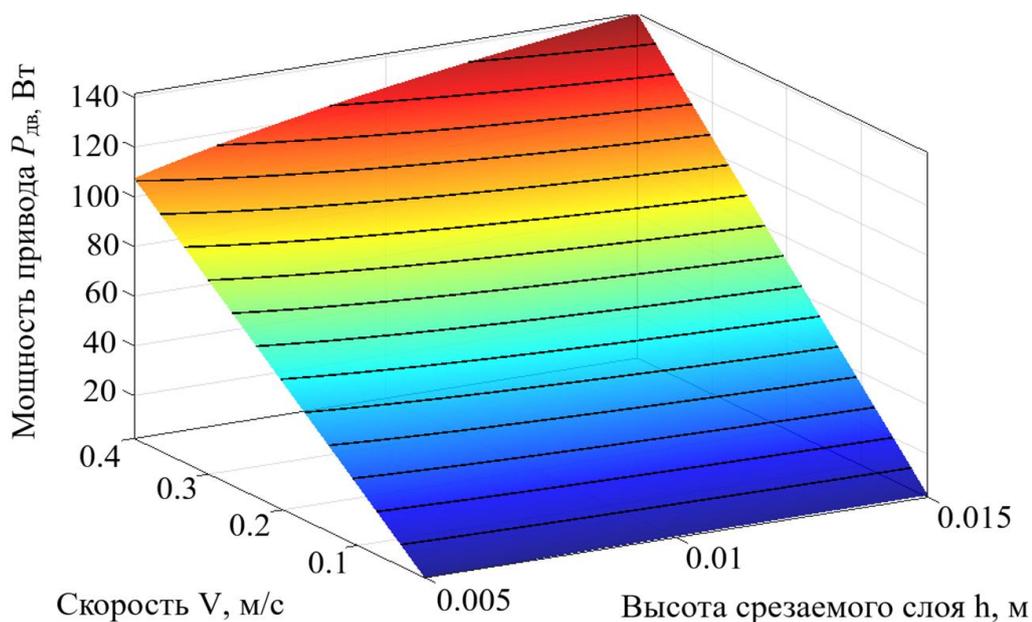


$$F_{дв} = 256,85 + 8982,67h + 73,33V - 250V^2,$$

$$R^2 = 0,98.$$

**Результаты обработки влияния на мощность привода  
скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя вермикомпоста**

№	Скорость движения $V$ , м/с	Высота слоя $h$ , м	Мощность $P_{дв}$ , Вт
1	0,01	0,005	2,8
2	0,1	0,005	26,2
3	0,2	0,005	51
4	0,3	0,005	76,7
5	0,4	0,005	103,8
6	0,01	0,01	3,3
7	0,1	0,01	31,5
8	0,2	0,01	61,8
9	0,3	0,01	92,2
10	0,4	0,01	124,6
11	0,01	0,015	3,6
12	0,1	0,015	35,8
13	0,2	0,015	70,1
14	0,3	0,015	105,2
15	0,4	0,015	142,8

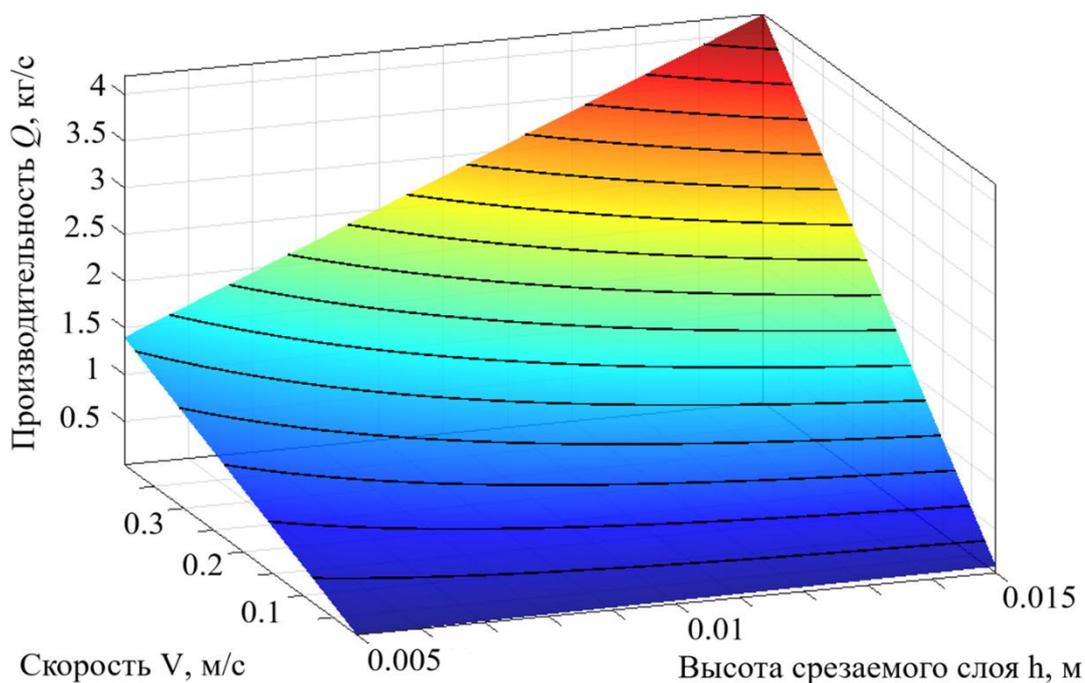


$$P_{дв} = 1010,24Vh^{0,25},$$

$$R^2 = 0,99.$$

**Результаты обработки влияния на производительность процесса выемки  
вермикомпоста скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя**

№	Скорость движения $V$ , м/с	Высота слоя $h$ , м	Производительность $Q$ , кг/с
1	0,01	0,005	0,03
2	0,1	0,005	0,3
3	0,2	0,005	0,6
4	0,3	0,005	1,0
5	0,4	0,005	1,4
6	0,01	0,01	0,07
7	0,1	0,01	0,7
8	0,2	0,01	1,4
9	0,3	0,01	2,1
10	0,4	0,01	2,8
11	0,01	0,015	0,1
12	0,1	0,015	1,0
13	0,2	0,015	2,0
14	0,3	0,015	3,0
15	0,4	0,015	4,1

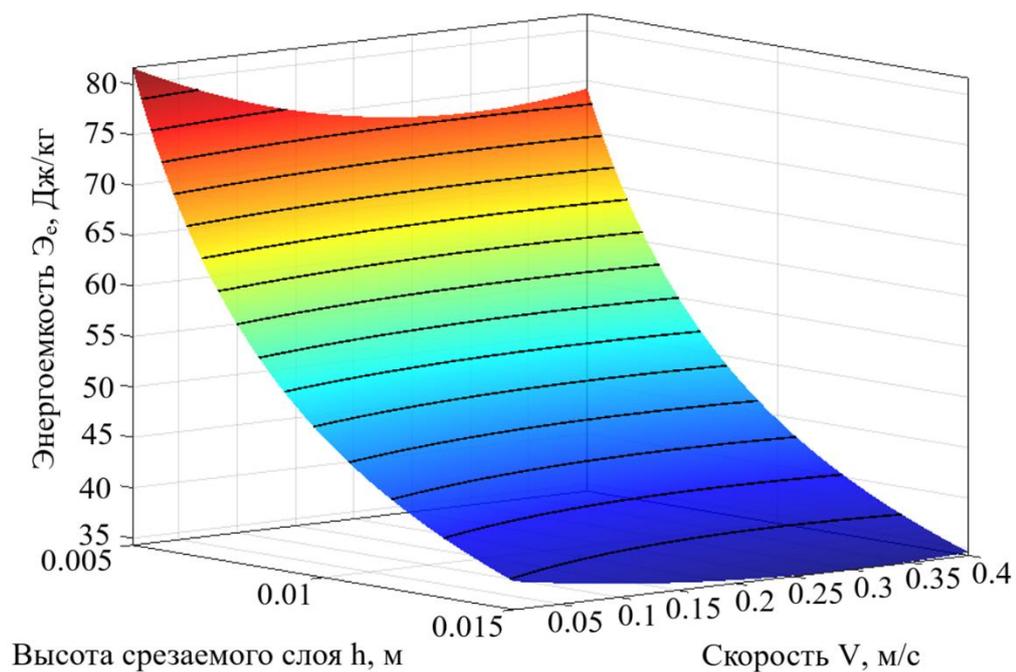


$$Q = 698,529hV,$$

$$R^2 = 0,99.$$

**Результаты обработки влияния на энергоёмкость процесса  
выемки вермикомпоста скорости движения ножа и высоты срезаемого слоя**

№	Скорость движения $V$ , м/с	Высота слоя $h$ , м	Энергоёмкость $\mathcal{E}_e$ , Дж/кг
1	0,01	0,005	80,0
2	0,1	0,005	74,2
3	0,2	0,005	71,3
4	0,3	0,005	71,0
5	0,4	0,005	71,9
6	0,01	0,01	47,2
7	0,1	0,01	43,7
8	0,2	0,01	43,8
9	0,3	0,01	42,6
10	0,4	0,01	44,3
11	0,01	0,015	34,7
12	0,1	0,015	33,9
13	0,2	0,015	33,4
14	0,3	0,015	32,2
15	0,4	0,015	33,4



$$\mathcal{E}_e = 14,83 + (0,5V^2 - 0,3V + 0,337) / h,$$

$$R^2 = 0,99.$$

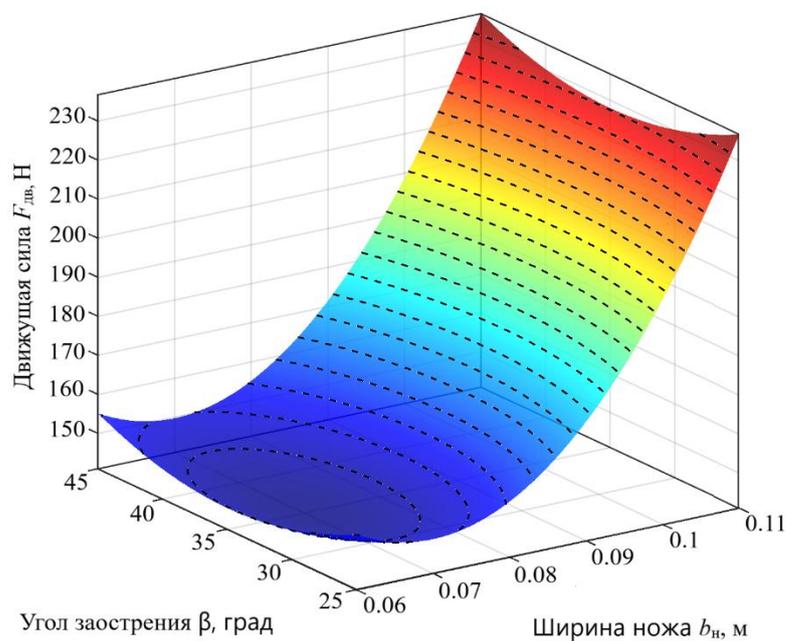
**РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА  
НА УСИЛИЕ ВЫЕМКИ ВЕРМИКОМПОСТА ИЗ УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Матрица некомпозиционного трехфакторного плана Бокса – Бенкена  
для исследования процесса отделения готового слоя вермикомпоста**

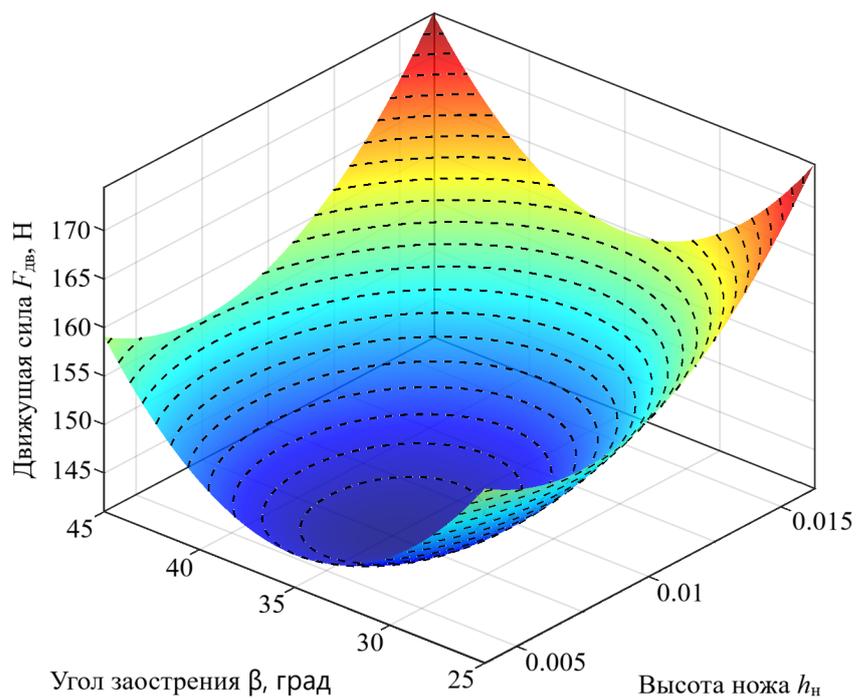
Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F_{дв}$
1	1	1	0	229
2	-1	-1	0	143
3	1	-1	0	157
4	-1	1	0	182
5	1	0	1	176
6	-1	0	-1	172
7	1	0	-1	216
8	-1	0	1	165
9	0	1	1	195
10	0	-1	-1	157
11	0	1	-1	238
12	0	-1	1	164
13	0	0	0	159
14	0	0	0	157
15	0	0	0	158

**Вспомогательная таблица для расчета экспериментального значения критерия Фишера**

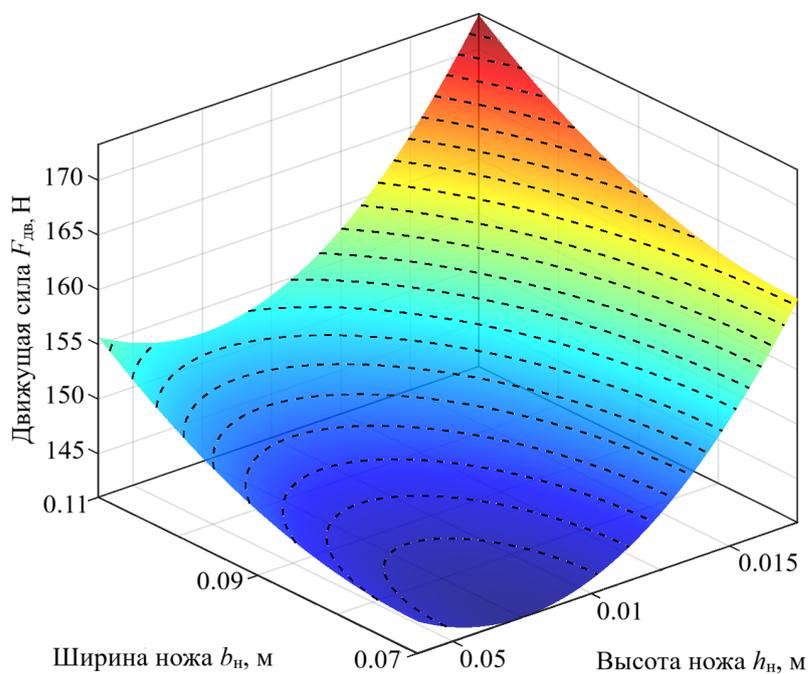
№ опыта	$y_1$	$\bar{y}_1$	$ y_1 - \bar{y}_1 $	$(y_1 - \bar{y}_1)^2$
1	229	228,375	0,63	0,391
2	143	144,625	1,63	2,641
3	157	155,125	1,88	3,516
4	182	183,875	1,88	3,516
5	176	176,125	0,13	0,016
6	172	171,875	0,13	0,016
7	216	215,375	0,63	0,391
8	165	165,625	0,63	0,391
9	195	192,5	2,50	6,250
10	157	159,5	2,50	6,250
11	238	240,25	2,25	5,063
12	164	161,75	2,25	5,063
13	159	158	1,00	1,000
14	157	158	1,00	1,000
15	158	158	0,00	0,000



$$Y - 141 = 21,749 X_2^2 + 8,751 X_3^2.$$



$$Y - 141 = 9,592X_1^2 + 14,658X_3^2.$$



$$Y - 141 = 8,021X_1^2 + 11,729X_2^2.$$



«УТВЕРЖДАЮ»

Исполнительный директор по научной работе

ФГБОУ ВО Самарский ГАУ

д-р. с.-х. наук, профессор

Н. М. Троиц

2026 г

## Справка

Материалы диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук аспиранта кафедры «Техническое обеспечение АПК» ФГБОУ ВО Вавиловского университета Шишкина Игоря Валерьевича «Повышение эффективности технологии производства вермикомпоста путем разработки и обоснования параметров устройства по выемке» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО Самарский ГАУ при изучении дисциплин «Механизация и автоматизация технологических процессов растениеводства и животноводства» и «Технология и механизация животноводства».

Заведующий кафедрой  
«Сельскохозяйственные машины и  
механизация животноводства»

Денисов С.В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор  
АО «Совхоз-Весна»  
Саратовской области
  
 Решетов А.А.  
 10.12.2025 г.

## АКТ

## внедрения научно-исследовательской работы

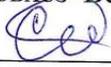
Мы, нижеподписавшиеся, представители АО «Совхоз–Весна» (главный механик Сафронов С.В., инженер механик Абазин А.П., заведующий РММ Подбельский В.М.) и представителей ФГБОУ ВО Вавиловский университет (доцент, кандидат технических наук Макаров С.А., профессор, доктор технических наук Демин Е.Е., аспирант Шишкин И.В.), составили настоящий акт в том, что результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на тему: «Повышение эффективности технологии производства вермикомпоста путем разработки и обоснования параметров устройства по выемке», выполненной на кафедре «Техническое обеспечение АПК», внедрены в АО «Совхоз-Весна» Саратовской области путем использования в течение шести месяцев 2025 года установки по производству вермикомпоста, разработанной по результатам исследований и оснащенной устройством по выемке готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора.

Использование устройства по выемке готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора в технологическом процессе производства органического удобрения дало возможность предприятию получить расчетный годовой экономический эффект по приведенным затратам 41275 рублей.

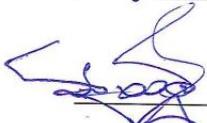
Установку по производству вермикомпоста, оснащенную устройством по выемке, стоит рекомендовать к внедрению на предприятиях по производству вермикомпоста.

Представители АО

«Совхоз–Весна»:

  
 Сафронов С.В.

  
 Абазин А.П.

  
 Подбельский В.М.

Представители ФГБОУ ВО

Вавиловский университет:

  
 Макаров С.А.

  
 Демин Е.Е.

  
 Шишкин И.В.

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Генеральный директор

АО «Совхоз-Весна»

Саратовской области



Решетов А.А.

10.17.2025 г.

**АКТ****ИСПЫТАНИЙ УСТАНОВКИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ  
ВЕРМИКОМПОСТА**

Комиссия в составе представителей АО «Совхоз-Весна» (главный механик Сафронов С.В., инженер механик Абазин А.П., заведующий РММ Подбельский В.М.) и представителей ФГБОУ ВО Вавиловский университет (доцент, кандидат технических наук Макаров С.А., профессор, доктор технических наук Демин Е.Е., аспирант Шишкин И.В.), составила настоящий акт испытаний и производственную проверку разработанного на кафедре «Техническое обеспечение АПК» на основании результатов исследований к.т.н., доцента Макарова С.А. и аспиранта Шишкина И.В, опытного образца установки по производству вермикомпоста, оснащенной устройством по выемке готового слоя вермикомпоста из вермиинкубатора.

Испытания и производственная проверка проводились в период с 26 мая по 10 ноября 2025 года.

Опытный образец установки, оснащенный электроприводом и продольно-движущимся трапециевидным ножом, был размещен в производственном помещении. Тензодатчик SBA-100L измерял усилия, возникающие при движении ножа в слое материала.

Параметры модульной установки представлены в таблице.

Производственная проверка установки показала её работоспособность и надежность выполнения технологического процесса производства вермикомпоста.

По результатам испытаний комиссия пришла к выводу, что установку можно использовать для производства вермикомпоста в соответствии с предложенными рекомендациями, представленными в таблице.

Параметр	Значение
<b>Габаритные размеры установки, мм</b>	
длина	3250
ширина	1300
высота	1250
Размеры ячеек нижнего основания, мм	50×50
Рабочий объем установки, м <sup>3</sup>	1,2
<b>Устройство для выемки вермикомпоста</b>	
производительность, т/ч	11,16
скорость, м/с	0,3
высота срезаемого слоя, мм	15
угол заострения режущей кромки ножа, град.	33

Представители АО

«Совхоз-Весна»:

  
\_\_\_\_\_ Сафронов С.В.

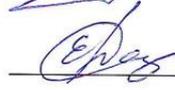
  
\_\_\_\_\_ Абазин А.П.

  
\_\_\_\_\_ Подбельский В.М.

Представители ФГБОУ ВО

Вавиловский университет:

  
\_\_\_\_\_ Макаров С.А.

  
\_\_\_\_\_ Демин Е.Е.

  
\_\_\_\_\_ Шишкин И.В.