

На правах рукописи

Везиров Александр Олегович

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССАХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ТЕПЛИЧНОГО ГРУНТА**

Специальность 4.3.1. – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Саратов 2023

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

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Павлов Павел Иванович

Официальные оппоненты: **Борисенко Иван Борисович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, главный научный сотрудник кафедры «Земледелие и агрохимия»

Милюткин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Самарский ГАУ, профессор кафедры «Технология производства и экспертиза продуктов из растительного сырья»

Соколов Николай Михайлович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока», главный научный сотрудник отдела механизации

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (г.Саранск).

Защита состоится «__» _____ 2023 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 35.2.035.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, д. 60, ауд. 325.

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

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

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета**



Василий Васильевич Чекмарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в Российской Федерации ежегодное потребление овощей составляет 109 кг на душу населения. Это на 24 % меньше нормы, рекомендованной Минздравом России. Объемы потребления свежих овощей в нашей стране ежегодно увеличиваются на 1 % и, по прогнозам, к 2028 г. достигнут 115 кг на душу населения.

Решающую роль в снабжении населения свежими овощами играет отрасль тепличного земледелия. Выращивание овощей в теплицах позволяет снизить влияние погодных условий на урожай и получать качественную продукцию в течение круглого года, что особенно актуально для нашей страны, поскольку большая часть ее территории расположена в климатических зонах, мало пригодных для возделывания овощей в открытом грунте.

Существуют различные технологии выращивания растений в теплицах: малообъемная, гидропонная, аэропонная и самая распространенная – выращивание на тепличном грунте. Последний способ, несмотря на трудоёмкость, позволяет получать продукцию с более высокими вкусовыми качествами. Кроме того, он полностью отвечает требованиям, которые согласуются с концепцией органического земледелия, поскольку имеется возможность готовить тепличный грунт из компонентов естественного происхождения, совсем не применяя искусственных материалов или сводя их использование к минимуму.

Помимо приготовления тепличного грунта, серьезной технической проблемой является полное или частичное удаление из помещения теплицы слоя грунта, уже отработавшего несколько культурооборотов, – санитарного слоя. На современном этапе развития отрасли тепличного производства к тепличному грунту предъявляют ряд агротехнических требований. Как следствие, для их выполнения необходима разработка новых технологий и технических средств.

Низкая производительность и высокая энергоёмкость процессов приготовления и использования тепличного грунта, а также недостаточное его качество связаны с отсутствием специализированных технологических машин для работы в теплицах. Машин из других областей сельскохозяйственного производства, применяемые в теплицах, имеют параметры, не соответствующие условиям теплиц и физико-механическим свойствам тепличных грунтов. В результате приготовление и использование тепличного грунта в необходимом количестве требуют больших материальных и трудовых затрат. Это приводит к значительному росту себестоимости производимой продукции, а также к снижению и недобору урожая.

Сокращения затрат на приготовление и использование тепличного грунта можно добиться путем разработки новой технологической схемы с одновременным выполнением отдельных процессов, а также обоснованием параметров экономичных рабочих органов технологических машин с требуемой для теплиц производительностью. Это является актуальной проблемой, решение которой имеет важное народнохозяйственное значение.

Исследования выполняли в 2010–2021 гг. в соответствии с «Концепцией развития аграрной науки и научного обеспечения АПК Российской Федерации до 2025 года», «Стратегией машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 года», «Стратегией развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года», «Стратегией социально-экономического развития Саратовской области до 2030 года» (Постановление Правительства Саратовской области от 30 июня 2016 г. № 321-П), научным направлением ФГБОУ ВО Вавиловский университет «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (рег. № 01201151795).

Научная гипотеза. Повышение эффективности приготовления и использования тепличного грунта за счет разработки ресурсосберегающей технологии и технических средств, обеспечивающих совмещение и одновременное выполнение операций и имеющих обоснованные рациональные параметры, соответствующие условиям применения.

Степень разработанности темы. Исследования, направленные на оптимизацию процессов разбрасывания различных органических и минеральных удобрений, выполняли Г. П. Варламов, Н. М. Марченко, Г. И. Личман, В. Д. Хмыров, В. В. Новиков, В. В. Коновалов, В. П. Терюшков, С. И. Щербаков, Ю. Е. Владимирский, А. А. Каликинский, Я. П. Лобачевский, К. Д. Есхожин и др.

Ряд работ посвящены изучению теории работы погрузчиков органических удобрений и почвообработке. К ним относятся работы А. А. Артюшина, И. Б. Борисенко, В. М. Бойкова, В. Ф. Дубинина, Е. Е. Демина, А. А. Ковалева, Н. Г. Ковалева, Н. К. Линника, Г. В. Левченко, И. И. Лукьянenkova, В. А. Милоткина, И. М. Панова, Н. В. Павлова, П. И. Павлова, С. В. Старцева, Н. М. Соколова, Р. Р. Хакимзянова и др.

Исследованиями в области технологий и средств механизации тепличного производства занимались и занимаются Л. А. Девочкина, В. П. Доронин, В. А. Корбут, Ю. Н. Липов, А. Ю. Липов, Г. А. Микаелян, Р. Дж. Нурметов, С. А. Чернов и др.

Перечисленные учёные внесли большой вклад в теорию и практику создания технических средств для обеспечения механизации процессов в сельскохозяйственном производстве. Однако существующие машины и рабочие органы предназначены для открытого грунта, что не позволяет использовать их в полной мере в тепличном производстве.

Данная работа дополняет и расширяет существующие исследования, предлагая новые машины для приготовления и использования тепличного грунта, обеспечивающие повышение качественных показателей работы и получение тепличного грунта, соответствующего агротехническим требованиям.

Цель работы – повышение производительности и снижение энергетических затрат на приготовление и использование тепличного грунта путем разработки новой ресурсосберегающей технологии, технических средств и обоснования параметров их рабочих органов.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих технологических схем приготовления и использования тепличного грунта и технических средств, применяемых для его приготовления, и определить причины их недостаточной эффективности.
2. Разработать ресурсосберегающую технологию, основанную на применении новых технических средств для приготовления, укладки и удаления грунта, а также модель для оценки ее эффективности.
3. Обосновать конструктивно-технологические схемы новых технических средств, существенно повышающих эффективность процессов приготовления и использования тепличного грунта.
4. Исследовать процессы взаимодействия рабочих органов технических средств с компонентами тепличного грунта и установить закономерности влияния физико-механических свойств, конструктивных параметров и скоростных режимов на их производительность, мощность, энергоемкость и качественные характеристики тепличного грунта; получить аналитические выражения для определения производительности, мощности и энергоемкости рабочих органов.
5. Получить экспериментальные зависимости и описывающие их вероятностно-статистические модели производительности, энергоемкости и технологических показателей тепличного грунта от конструктивных и режимных параметров для компонентов с различными физико-механическими свойствами.
6. Дать технико-экономическую оценку эффективности предлагаемой технологии и использования технических средств с обоснованными параметрами рабочих органов в условиях тепличного производства.

Объект исследования – технологический процесс, включающий в себя операции смешивания компонентов с одновременной погрузкой, а также укладку и удаление тепличного грунта.

Предмет исследования – взаимосвязь параметров технологических машин для приготовления и использования тепличного грунта и их рабочих органов с производительностью, потребляемой мощностью, энергоемкостью и качественными показателями.

Научную новизну работы представляют:

- теоретическое и экспериментальное исследование взаимодействия рабочих органов комбинированного укладчика, погрузчика-смесителя и машины для удаления тепличного грунта, определение рациональных параметров производительности и энергоемкости технологических процессов; модель оценки эффективности предлагаемой технологии приготовления и использования тепличного грунта;
- аналитические выражения для силовых взаимодействий рабочих органов предлагаемых технических средств с тепличным грунтом и его компонентами; мощности для привода; производительности и энергоемкости смешивания с одновременной погрузкой, укладки тепличного грунта и последующего его удаления, учитывающие физико-механические свойства теплич-

ного грунта; способ воздействия и характер движения, конструктивные и режимные параметры;

- закономерности влияния конструктивно-режимных параметров дозирующих барабанов и цепного транспортера комбинированного укладчика, шнекофрезерного рабочего органа погрузчика-смесителя, ковша и отвала машины для удаления тепличного грунта на производительность и энергоемкость процессов смешивания с одновременной погрузкой, укладки и удаления тепличного грунта.

Новизна технических решений машин для работы с тепличным грунтом подтверждена патентами Российской Федерации на изобретение № 2621041 и полезную модель № 211840, № 117906, № 119337.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследований позволяют решить актуальную проблему ресурсосбережения в процессе приготовления и использования тепличного грунта в растениеводстве защищенного грунта путем повышения производительности и снижения энергоемкости выполнения технологических операций за счет применения новых машин и рабочих органов.

Ценность для науки представляют полученные теоретические зависимости, позволяющие определить оптимальные конструктивные и режимные параметры, при которых производительность, приводная мощность и энергоемкость принимают оптимальные значения, обеспечивая эффективность процессов приготовления и использования тепличного грунта. Практическая значимость работы состоит в разработке конструктивно-технологических схем машин, экспериментальном обосновании конструктивных и режимных параметров рабочих органов, а также в оценке результатов эффективности использования предлагаемых машин и определении оптимальных условий работы.

Эффективность предлагаемой технологии приготовления и использования грунта, а также технические характеристики технологических машин для выполнения операций по данной технологии подтверждены производственными испытаниями и внедрены в АО «Совхоз – Весна» (г. Саратов), ИП Шатько Л. А. – Ноябрьский садовый центр (г. Ноябрьск, ЯНАО), ООО «Агрофирма ПАРТНЕР» (г. Москва).

Методология и методы исследования. Основу методической базы исследований составлял системный подход, рассматривающий объект исследования как комплекс взаимосвязанных элементов. Экспериментальная часть включала в себя методы лабораторно-полевых и производственных испытаний, а также теорию планирования эксперимента. Для интерпретации и анализа результатов исследований применяли методы математического моделирования, регрессионного анализа и графической визуализации, для чего был использован пакет прикладных компьютерных программ для обработки экспериментальных данных.

Научные положения, выносимые на защиту:

- математические модели эффективности технологического процесса приготовления и использования тепличного грунта на основе системы критериев

оптимизации – производительности, усилий взаимодействия, приводной мощности, энергоемкости как факторов, значимых для применяемых рабочих органов;

- механико-математическое обоснование параметров и режимов работы в соответствии с необходимой производительностью и минимальной энергоемкостью выполнения технологических операций предлагаемым комплексом машин для работы с тепличным грунтом: комбинированный укладчик, погрузчик-смеситель, машина для удаления тепличного грунта;

- экспериментальные вероятностно-статистические модели влияния конструктивно-режимных параметров рабочих органов (дозировющих барабанов и цепного транспортера комбинированного укладчика; шнекофрезерного рабочего органа погрузчика-смесителя; ковша и отвала машины для удаления тепличного грунта) на производительность и энергоемкость технологического процесса смешивания, укладки и удаления тепличного грунта;

- результаты теоретической и экспериментальной оптимизации параметров комбинированного укладчика, погрузчика-смесителя, машины для удаления тепличного грунта.

Апробация результатов. Степень достоверности результатов исследований обеспечена использованием общепризнанных методов исследований в области классической механики и математического анализа, точностью сертифицированных средств измерения параметров и сходимостью результатов экспериментальных и теоретических исследований.

Основные научные положения работы были доложены и одобрены на следующих научно-практических конференциях: «Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства» (Москва, 2015 г.); «Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы» (Пенза, 2020 г.); «Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика» (Уфа, 2020 г.); XXXIV конференция им. В. В. Михайлова «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники» (Саратов, 2021 г.); «Агробиоинженерные инновации в сельском хозяйстве» (ВИМ, Москва, 2021 г.); V конференция «Агробизнес, экологический инжиниринг и биотехнологии» – V International Scientific Conference on Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies – AGRITECH V – 2021 (Красноярск, Волгоград, Бухара, 2021 г.); «Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства» (Пенза, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 38 печатных научных работ, в том числе 3 в перечне изданий, индексируемых в международной базе данных Scopus, 14 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования России, включая три статьи без соавторов. Получено три патента Российской Федерации на полезную модель и один на изобретение. Общий объем публикаций составил 12,75 печ. л., из них 7,3 печ. л. принадлежат лично автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы из 325 наименований, из которых 23 на иностранном языке. Работа изложена на 335 страницах, содержит 130 рисунков, 18 таблиц и 9 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность работы, ее практическая значимость, цель и задачи исследований, научная новизна, апробация работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе «Состояние проблемы. Цель и задачи исследований»** приведен анализ состояния технологических процессов приготовления и использования тепличного грунта, систематизированы сведения по физико-механическим свойствам компонентов и наиболее распространенным видам тепличного грунта. Представлен анализ существующих технических средств, применяемых для работы с грунтом в теплицах, конструктивно-технологических схем их рабочих органов, технико-экономических показателей и ранее выполненных исследований.

Проведенный анализ показал, что с одной стороны есть потребность и необходимость увеличения производства продукции в тепличном растениеводстве для круглогодичного обеспечения населения овощной и другой продукцией. С другой стороны, отсутствие адаптированных ресурсосберегающих технических средств для механизации производственных процессов приготовления и использования тепличного грунта приводит к увеличению материальных и трудовых затрат, что не позволяет производить продукцию требуемого качества в необходимых объемах.

В связи с создавшейся ситуацией возникает актуальная проблема отсутствия системного подхода и научного обоснования процессов и параметров рабочих органов технологических машин для приготовления и использования тепличного грунта. Создание новых и совершенствование существующих технических средств для приготовления и использования тепличного грунта следует вести в направлении совмещения операций для обеспечения требуемой производительности и качества при минимальной энергоемкости.

Во **второй главе «Теоретическое исследование процессов приготовления и использования тепличного грунта»** на основании анализа существующих технологических схем предложены общая модель оценки эффективности процесса приготовления и использования грунта, а также новая технология и комплекс машин для ее выполнения.

Показателями эффективности технологии являются суммарная энергоемкость производственных процессов, производительность технологических процессов и удельная трудоемкость, материалоемкость и качественные показатели получаемого технологического результата.

Тогда модель повышения эффективности ЭТ технологического процесса приготовления и использования тепличного грунта примет вид:

$$\text{ЭТ} = \frac{K_E}{\sum_{n=1}^N (\Delta E_{\downarrow})} K_Q \Delta Q^{\uparrow} \frac{K_M}{\sum_{n=1}^N (\Delta M_{\downarrow})} K_K \Delta K^{\uparrow}, \quad (1)$$

где K_E, K_Q, K_M, K_K – коэффициенты значимости соответственно энергоёмкости, производительности, материалоемкости, качества; ΔE_{\downarrow} – показатель суммарного снижения энергоёмкости технологических процессов; ΔQ^{\uparrow} – показатель повышения производительности и снижения удельной трудоёмкости; ΔM_{\downarrow} – показатель снижения материалоемкости технологических процессов; ΔK^{\uparrow} – показатель повышения качества получаемого тепличного грунта.

Решением модели (1) будет интегрирование всего комплекса параметров по длине и времени выполнения операций технологического процесса приготовления и использования тепличного грунта:

$$\text{ЭТ} = \iint \left(\frac{K_E}{\sum_{n=1}^N (\Delta E_{\downarrow})} K_Q \Delta Q^{\uparrow} \frac{K_M}{\sum_{n=1}^N (\Delta M_{\downarrow})} K_K \Delta K^{\uparrow} \right) d/dt. \quad (2)$$

Модели (1) и (2) отражают системный подход к комплексному решению проблемы ресурсосбережения в технологическом процессе приготовления и использования тепличного грунта. Модель (2) эффективности предлагаемой технологии по отношению к существующей будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \text{ЭТ}_c = & \frac{K_E}{\frac{E_1^n + E_2^n + E_3^n}{(E_{11}^c + E_{12}^c + E_{13}^c) + (E_2^c + E_3^c) + (E_4^c + E_5^c)}} K_Q \left(\frac{Q_1^n}{Q_1^c} + \frac{Q_2^n}{\frac{Q_2^c + Q_3^c}{2}} + \frac{Q_3^n}{\frac{Q_4^c + Q_5^c}{2}} \right) \times \\ & \times \frac{K_M}{\frac{M_1^n + M_2^n + M_3^n}{M_1^c + (M_2^c + M_3^c) + (M_4^c + M_5^c)}} K_K \left(\frac{K_{cm}^n}{K_{cm}^c} + \frac{K_{b1}^n}{K_{b1}^c} + \frac{K_{b2}^n}{K_{b2}^c} \right), \quad (3) \end{aligned}$$

где E_1^n, E_2^n, E_3^n – энергоёмкость соответствующих процессов предлагаемой технологии; $E_{11}^c, E_{12}^c, E_{13}^c, E_2^c, E_3^c, E_4^c, E_5^c$ – энергоёмкость соответствующих процессов существующей технологии; производительность процессов: предлагаемой технологии – Q_1^n, Q_2^n, Q_3^n , существующей – $Q_1^c, Q_2^c, Q_3^c, Q_4^c, Q_5^c$; материалоемкость процессов: предлагаемой технологии – M_1^n, M_2^n, M_3^n ; существующей – $M_1^c, M_2^c, M_3^c, M_4^c, M_5^c$; K_{cm}^n, K_{cm}^c – показатели качества смешивания предлагаемой и

существующей технологии соответственно; $K_{в1}^n, K_{в1}^c$ – показатели влагоёмкости тепличного грунта, подготовленного по предлагаемой и существующей технологии; $K_{в2}^n, K_{в2}^c$ – показатели воздухоёмкости тепличного грунта, подготовленного по предлагаемой и существующей технологии.

Влияние каждой группы показателей оценивали коэффициентами значимости, определяемыми экспериментально-аналитическим путем.

На основании общей модели разработана ресурсосберегающая технология приготовления и использования грунта, основанная на одновременном выполнении нескольких операций и минимизации используемых технических средств (рисунок 1). Операции 1, 2 – загрузка компонентов будущего тепличного грунта в комбинированный укладчик. Благодаря наличию нескольких изолированных друг от друга бункеров в него загружают несколько разнородных материалов: в передний бункер – основной компонент (земля, чернозем, перепревший навоз и др.), в два других – компоненты с меньшим требуемым объемом укладки (удобрения, навоз, торф, лузга, опилки и др.). Операция 3 – укладка компонентов грунта на поверхность площадки, ее производят одновременно из всех бункеров послойно за один проход (в существующих технологиях каждый компонент укладывают отдельно). Операция 4 – смешивание компонентов и погрузка готового грунта в транспортное средство. Совмещение процессов смешивания и погрузки достигается за счет использования погрузчика-смесителя, оснащенного специальным шнекофрезерным рабочим органом (в существующих технологиях сначала выполняют смешивание и отдельно погрузку). Операция 5 – транспортирование подготовленного тепличного грунта в помещение, операция 6 – укладка тепличного грунта на поверхности пола теплицы. Для укладки в теплице готового грунта в предлагаемой технологической схеме использован комбинированный укладчик. Далее следует цикл выращивания культур. После удаления растительной массы необходимо заменить грунт полностью или только его часть (санитарный слой) – операция 7.

Преимущества предлагаемой технологии заключаются в совмещении операций укладки нескольких компонентов, смешивания и погрузки тепличного грунта, удаления и погрузки санитарного слоя (рисунок 2). Благодаря этому значительно повышается производительность, снижается энергоёмкость, сокращаются затраты ручного труда на весь комплекс работ.

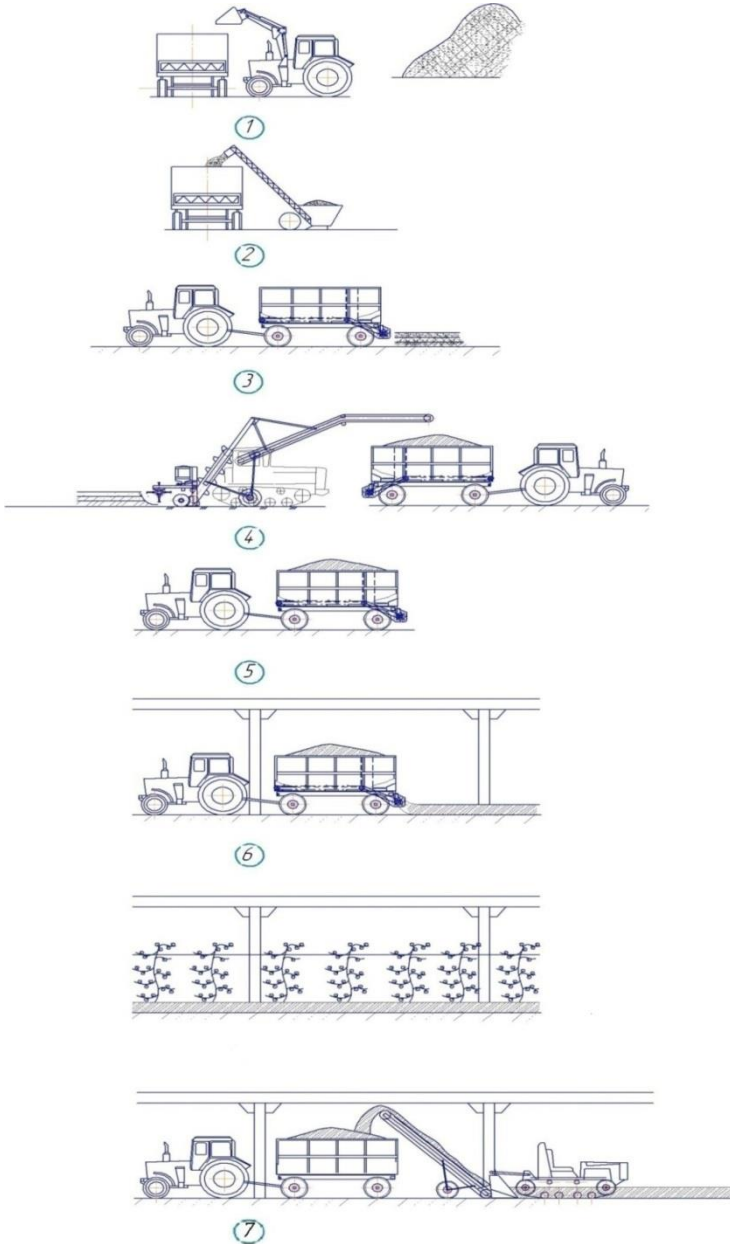


Рисунок 1 – Предлагаемая технологическая схема приготовления и использования грунта

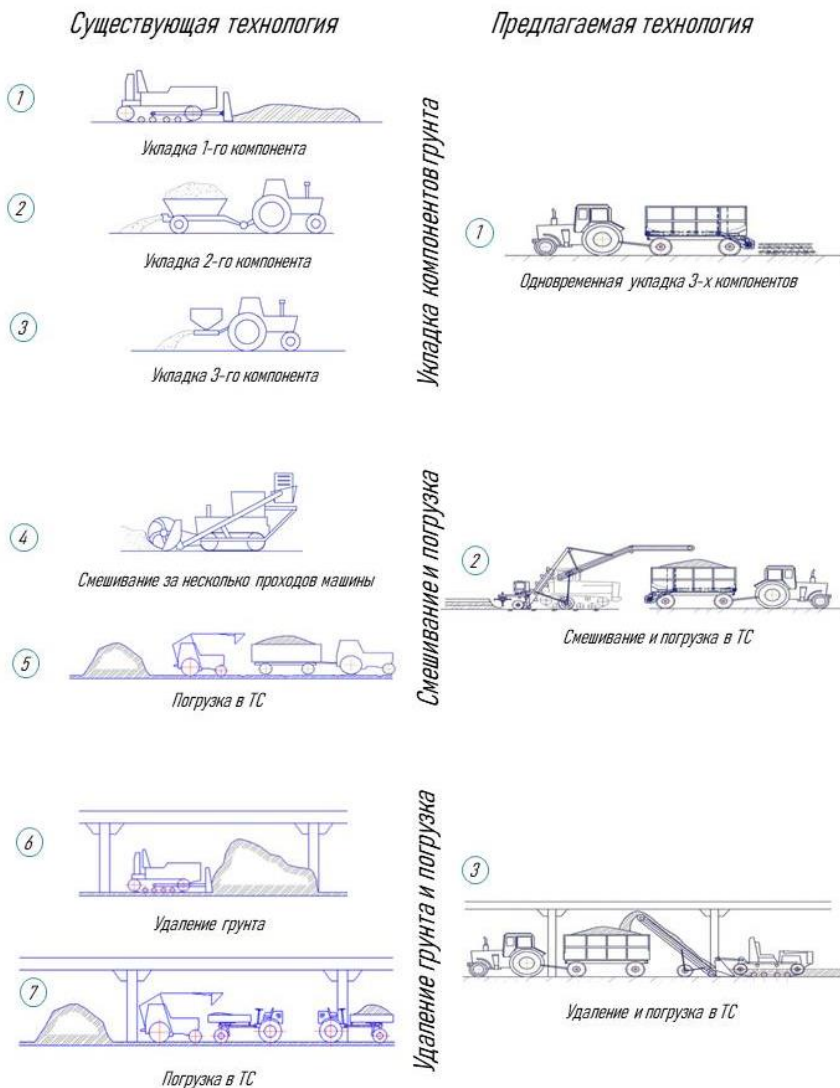


Рисунок 2 – Сравнение технологических операций существующей и предлагаемой технологии

Данная технологическая схема основана на использовании новых машин с рабочими органами, адаптированными для работы с тепличным грунтом.

Предлагаемая конструктивно-технологическая схема комбинированного укладчика почвенных компонентов (патент РФ № 211840) включает в себя

три бункера (рисунок 3): 1 – в передней части кузова, 2 – средний бункер, 3 – задний. Бункеры установлены на раме с колесами 8. Бункер 1 имеет расположенный у днища цепной транспортер 7 и дополнительно снабжен регулировочной шиберной заслонкой 9 и направляющей пластиной 10. Бункеры 2 и 3 имеют выгрузные устройства 11, внутри которых установлены отсекатели 13 и дозирующие барабаны 12 с продольными планками 16. Агрегатирование укладчика производится с помощью сцепки 4.

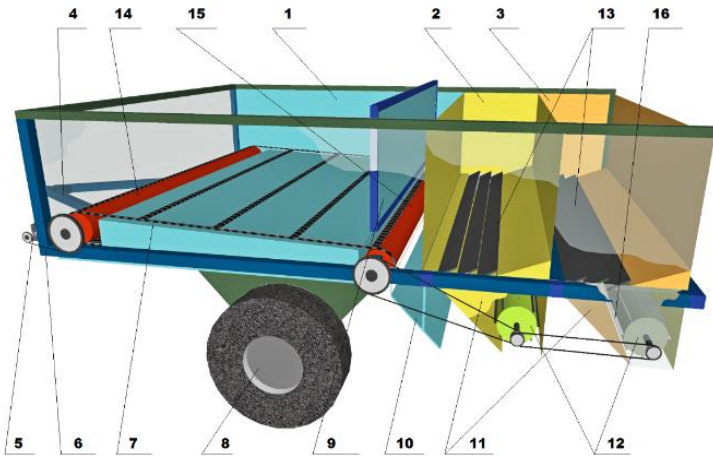


Рисунок 3 – Схема комбинированного укладчика: 1, 2, 3 – бункеры; 4 – сцепка; 5 – гидромотор; 6 – цепная передача; 7 – транспортер; 8 – рама с колесами; 9 – заслонка; 10 – направляющая пластина; 11 – выгрузные устройства; 12 – дозирующие барабаны; 13 – отсекатели; 14 – ведущий вал транспортера; 15 – ведомый вал; 16 – продольные планки

Привод рабочих органов осуществляется от гидромотора 5, вращение от которого передается на цепную передачу 6. Ведомая звездочка цепной передачи 6, расположенная на ведущем валу 14 цепного транспортера 7, приводит его в движение. Вращение к дозирующим барабанам передается через передачу гибкой связью с ведомого вала 15 цепного транспортера 7. Отсекатели 13 в бункерах 2 и 3 позволяют регулировать подачу компонентов на дозирующие барабаны 12 за счет поворота пластин и изменения зазоров между ними.

Следующими операциями после укладки компонентов являются одновременное их смешивание и погрузка. Для их осуществления предлагается погрузчик-смеситель (патент на полезную модель № 119337).

Машина выполнена на единой раме 4 (рисунок 4) в полунавесном исполнении на малогабаритный гусеничный трактор 1. В конструкцию также входят рабочий орган 2 в виде ленточного шнека с установленными на стойках зубьями и отгрузочный транспортер 3. Погрузчик-смеситель при движении и

работе опирается на гидравлическую заднюю навеску базовой машины и колесо 5. Привод рабочих органов – комбинированный, от вала отбора мощности и гидромотора. Преимущество предлагаемого погрузчика-смесителя состоит в адаптированности схемы работы и принципа действия рабочих органов к ограниченному пространству теплиц. При этом обеспечивается высокое качество смешивания при одновременном выполнении процесса смешивания и погрузки, что позволяет повысить производительность и снизить затраты.

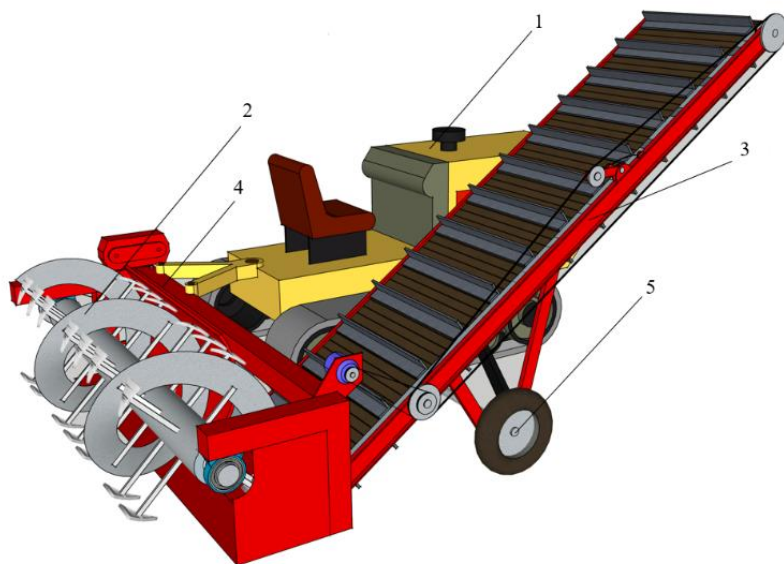


Рисунок 4 – Схема погрузчика-смесителя: 1 – гусеничный трактор; 2 – рабочий орган; 3 – отгрузочный транспортер; 4 – рама; 5 – колесо

Разработана также машина для удаления и погрузки тепличного грунта (патент на изобретение № 2621041), которая включает в себя отгрузочный транспортер 1 (рисунок 5), раму 2, отвал 8, систему агрегатирования 7, механизм привода 4, соединительные полосы 3. Ковш 6, состоящий из отвала 8 и верхней части 5, взаимодействует с транспортером 1 посредством соединительной полосы 3, установленной по бокам ковша 6. Система агрегатирования 7 и механизм привода 4 смонтированы на верхней части 5 ковша 6. Предлагаемое расположение механизмов навески и привода позволяет уменьшить габариты машины, сделать ее более компактной, что необходимо при работе в теплицах. Отгрузочный транспортер жестко соединен с отвалом посредством соединительных полос и расположен нижней частью за режущей кромкой днища отвала.

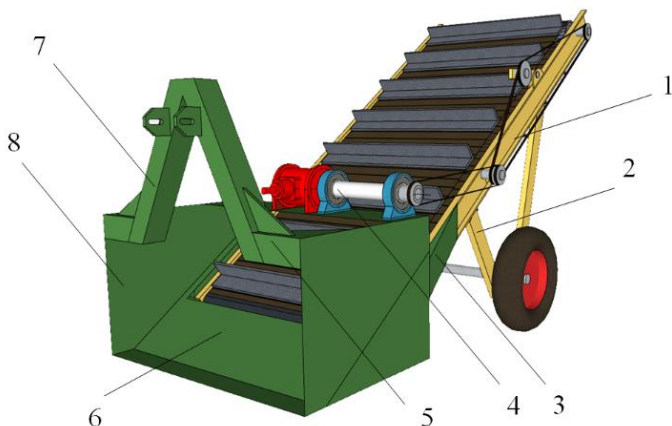


Рисунок 5 – Машина для удаления и погрузки тепличного грунта: 1 – отгрузочный транспортер; 2 – рама; 3 – соединительные полосы; 4 – механизм привода; 5 – верхняя часть; 6 – ковш; 7 – система агрегатирования; 8 – отвал

Теоретический анализ позволил получить математические модели усилий взаимодействия, мощности, производительности и энергоёмкости.

Исследован процесс взаимодействия рабочих органов комбинированного укладчика с тепличным грунтом и его компонентами. При работе цепного транспортера в переднем бункере усилие скребка $F_{ск}$ будет преодолевать следующие сопротивления (рисунок 6): $F_{сд}$ – сила, необходимая для отделения слоя компонента деформацией сдвига, Н; $F_{трп}$ – сила, необходимая для преодоления трения скребка с отделенным слоем по поверхности компонента в переднем бункере, Н; $F_{трн}$ – сила, необходимая для преодоления трения скребка с отделенным слоем по поверхности настила, Н; $F_{инк}$ – сила инерции отделенной массы при ее разгоне до скорости скребков v_c , Н.

Суммарное усилие $\Sigma F_{сц}$ для перемещения цепи со скребками:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{сц} = \Sigma F_{ск} + F_y = (F_{сд} + F_{трп} + F_{трн} + F_{инк}) \frac{l_{тр}}{l_{ск}} + F_y = \\ = \left(K_{сд} l_{ск} b_{ск} \tau_{сд} + g \rho_k l_{ск} b_{ск} h_k f_{вн} + g \rho_k l_{ск} b_{ск} h_{кл} f_n + m \frac{v_c}{t} \right) \frac{l_{тр}}{l_{ск}} + \\ + \sigma_k b_{ск} h_{ок}, \end{aligned} \quad (4)$$

где F_y – усилие на скребке от уплотнения удобрений, $F_y = \sigma_k b_{ск} h_{ок}$, σ_k – напряжение крошения компонента, Па, $h_{ок}$ – высота отделенного слоя компонента перед заслонкой, м; $l_{тр}$ – длина цепного транспортера, м; $l_{ск}$ – расстояние между скребками (шаг), м; $K_{сд}$ – коэффициент увеличения площади сдви-

га, учитывающий отклонение реальной формы поверхности сдвига от теоретической; $b_{ск}$ – толщина скребка, м; $\tau_{сд}$ – напряжение сдвига компонента, Па; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_k – плотность компонента, кг/м³; h_k – высота слоя компонента в переднем бункере, м; $f_{вн}$ – коэффициент внутреннего трения; $h_{кп}$ – полная высота слоя компонента в переднем бункере, м; f_n – коэффициент трения по поверхности настила; m – масса отделенного компонента, кг; v_c – конечная скорость разгона массы отделенного компонента, м/с; t – время разгона массы отделенного компонента до скорости v_c , с.

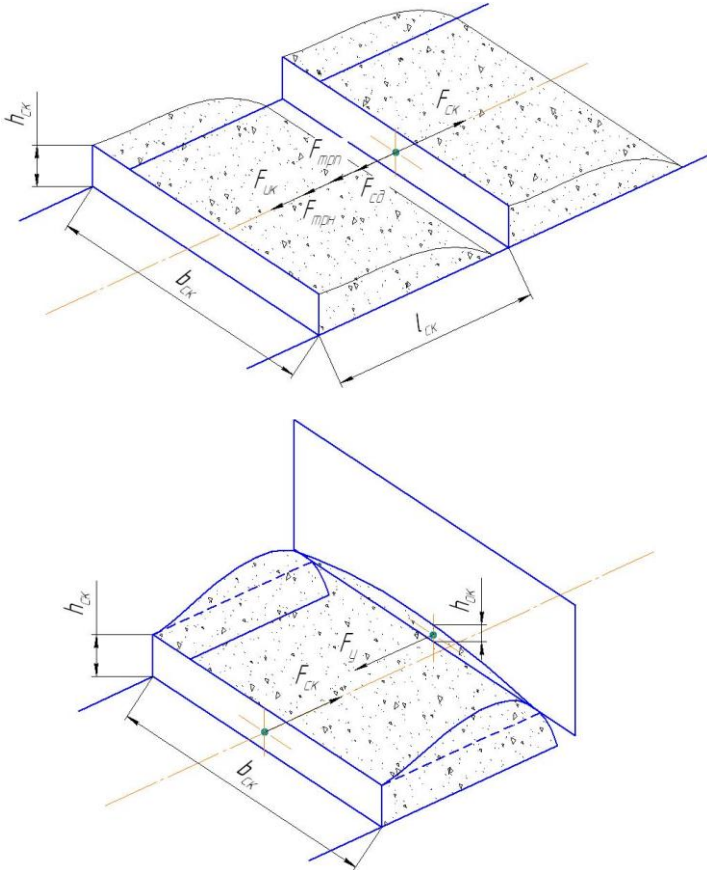


Рисунок 6 – Схема сил, действующих на скребковый транспортер в переднем бункере

Воздействие планки дозирующего барабана комбинированного укладчика на частицу в совокупности с другими силами определяет ее дальнейшее движение (рисунок 7).

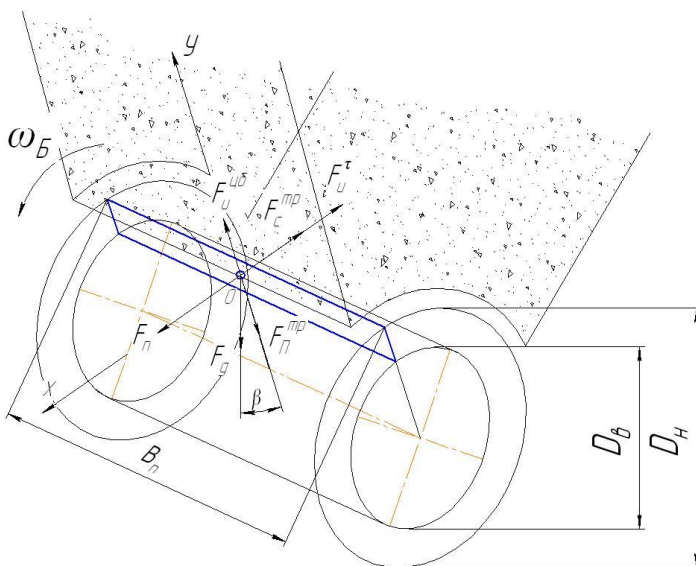


Рисунок 7 – Схема сил при взаимодействии планки барабана с частицей

Сила тяжести F_g обуславливает движение частицы из бункера на барабан вертикально вниз. Поскольку частица оказывает воздействие на планку, то возникает сила трения о поверхность планки F_{tr}^n , Н. При попадании частицы на планку возникает сила реакции планки F_n , направленная перпендикулярно ее поверхности. Далее частица вращается вместе с барабаном, поэтому возникает центробежная сила инерции F_{in}^{ub} , Н. Тангенциальная сила инерции F_{in}^t направлена перпендикулярно поверхности планки. Поскольку частицы движутся дискретным, но плотным потоком, действует сила трения между ними F_c^{tp} , Н. Уравнения проекций сил будут иметь вид:

$$\Sigma F_x = F_n + F_g \cos \beta - F_{in}^t - F_c^{tp}; \quad (5)$$

$$\Sigma F_y = F_{tr}^n + F_g \sin \beta - F_{in}^{ub}.$$

Итоговое выражение для усилия на планке:

$$F_n = m \left(\frac{\omega_B R_n}{t} - g \cos \beta \right) + f_{вн} m_{кв} g, \quad (6)$$

где m – масса частицы компонента, кг; ω_6 – угловая скорость барабана, рад/с; $R_ч$ – радиус вращения частицы на планке, м; t – время разгона частицы до скорости $v_ч$, с; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – угол поворота планки, град.; $f_{вн}$ – коэффициент внутреннего трения; $m_{к6}$ – масса компонента в бункере над планкой, кг.

Мощность, затрачиваемая на привод комбинированного укладчика, определяется как сумма мощности привода цепного транспортера ($P_{тр}$, Вт) и мощности привода первого (P_{61} , Вт) и второго (P_{62} , Вт) дозирующих барабанов (индекс «1» относится к первому барабану, индекс «2» – ко второму):

$$P_y = P_{тр} + P_{61} + P_{62}; \quad (7)$$

$$P_y = \left\{ \left(K_{сд} l_{сд} b_{сд} \tau_{сд} + g \rho_{к} l_{к} b_{к} h_{к} f_{вн} + g \rho_{к} l_{к} b_{к} h_{кп} f_{н} + m \frac{v_ч}{t} \right) \frac{l_{тр}}{l_{сд}} + \sigma_{к} b_{сд} h_{ок} \right\} v_ч + \\ + 0,5 z_{n1} D_{61} \omega_{61} \left(m_1 \frac{\omega_{61} R_{ч1}}{t} + f_{вн1} m_{к61} g - m_1 g \cos \beta \right) + \\ + 0,5 z_{n2} D_{62} \omega_{62} \left(m_2 \frac{\omega_{62} R_{ч2}}{t} + f_{вн2} m_{к62} g - m_2 g \cos \beta \right). \quad (8)$$

Для отделения и захвата компонентов, уложенных комбинированным укладчиком, каждая точка шнекофрезерного рабочего органа погрузчика-смесителя описывает циклоиду в двухмерной системе координат:

$$X_A = R_A \cos(\omega t) + vt;$$

$$Y_A = R_A \sin(\omega t), \quad (9)$$

где ω – угловая скорость ленточного шнека, рад/с; v – линейная скорость рабочего органа вместе с трактором, м/с; t – время, с; R_A – радиус вращения точки A (от оси вала ленточного шнека до местоположения точки), м.

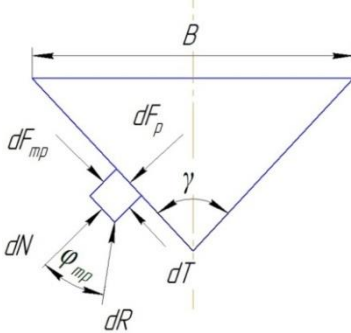


Рисунок 8 – Схема сил при внедрении зуба

При внедрении зуба элементарная частица компонента между режущей кромкой зуба и другими частицами создает сопротивление внедрению. Сопротивление внедрению элементарной ширины зуба dB создает элементарная реакция $d\bar{R}$, отклоненная от перпендикуляра к режущей кромке на угол $\varphi_{тр}$ (рисунок 8). Также возникает элементарная сила $d\bar{F}_{тр}$, направленная вдоль кромки зуба. Ее величина будет равна элементарной реакции $d\bar{R}$. Сила резания зависит от напряжения резания

на элементарной площадке dA , т. е. $dR = \sigma_p dA$, где σ_p – напряжение резания компонентов почвы, МПа.

Сила отделения компонента режущей кромкой R (Н):

$$R = \sigma_p A = \sigma_p bB, \quad (10)$$

где B – ширина зуба, мм; b – толщина режущей кромки, мм.

Усилие на зубе F_3 (Н):

$$F_3 = R \sin\left(\varphi_{\text{тр}} + \frac{\gamma}{2}\right) = \sigma_p bB \sin\left(\varphi_{\text{тр}} + \frac{\gamma}{2}\right), \quad (11)$$

где $\varphi_{\text{тр}}$ – угол трения по стали, град.; γ – угол при вершине, град.

Суммарное усилие резания всеми зубьями ΣF_3 (Н):

$$\Sigma F_3 = z_t \sigma_p bB \sin\left(\varphi_{\text{тр}} + \frac{\gamma}{2}\right), \quad (12)$$

где z_t – число зубьев, одновременно взаимодействующих с компонентами тепличного грунта в момент времени t .

Качество смешивания зависит от степени крошения компонентов почвы. Наилучшее крошение достигается при криволинейной форме зубьев. В этом случае площадь взаимодействия зуба с отделяемым компонентом значительно больше, соответственно, больше усилие на грунт:

$$F_{\Sigma} = F_k + F_{\text{тр}} + F_3 = \sigma_p bB + k_f m f + \sigma_{\text{сж}} A_3, \quad (13)$$

где k_f – коэффициент, учитывающий влияние угла наклона поверхности зуба; m – масса отделенного слоя, кг; f – коэффициент трения компонента тепличного грунта по поверхности зуба; $\sigma_{\text{сж}}$ – напряжения сжатия, при которых происходит разрушение отделяемого компонента почвенной смеси, Па; A_3 – площадь поверхности зуба, взаимодействующей с отделяемым материалом, м^2 .

Мощность P_p , затрачиваемая на отделение компонентов зубьями, в общем случае:

$$P_p = \Sigma F_3 v_3 = \frac{z_3}{4} \sigma_p bB \sin\left(\varphi_{\text{тр}} + \frac{\gamma}{2}\right) v_3, \quad (14)$$

где z_3 – полное число зубьев, установленных на рабочем органе; v_3 – окружная скорость зубьев, м/с.

При общей высоте массива компонентов, равной половине диаметра шнекофрезерного рабочего органа:

$$P_p = \Sigma F_3 v_3 = \frac{\pi z_3 D_p}{32n} \sigma_p bB \sin\left(\varphi_{\text{тр}} + \frac{\gamma}{2}\right); \quad (15)$$

при любой высоте уложенных компонентов, меньшей диаметра D_p :

$$P_p = \frac{\pi z_3 D_p}{32n} \sigma_p b B \sin\left(\varphi_{тр} + \frac{\gamma}{2}\right) \frac{\theta}{180}, \quad (16)$$

где D_p – диаметр резания, или диаметр, по которому установлены режущие зубья, м; n – частота вращения рабочего органа, c^{-1} ; θ – центральный угол между нижней и верхней точками, определяющими положение слоев компонентов, град.

Частицы компонентов, отделенные зубьями, перемещаются винтовой поверхностью рабочего органа на отгрузочный транспортер. С учетом дополнительных сопротивлений от стоек зубьев мощность на транспортирование трехкомпонентного тепличного грунта P_τ :

$$P_\tau = 2gn(\rho_1 B_3 \frac{v\pi(y_2 - y_1)}{2\omega} + \rho_2 B_3 \frac{v\pi(y_3 - y_2)}{2\omega} + \rho_3 B_3 \frac{v\pi(y_4 - y_3)}{2\omega}) z K_z L K_c K_n K_{ct}, \quad (17)$$

где g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; ρ_1, ρ_2, ρ_3 – плотность 1-го, 2-го, 3-го компонентов соответственно, $кг/м^3$; B_3 – ширина зуба, м; v – поступательная скорость погрузчика-смесителя, $м/с$; y_1, y_2, y_3, y_4 – верхние границы слоев каждого компонента, м; z – количество зубьев, одновременно выполняющих отделение, шт.; K_z – коэффициент влияния зубьев на заполнение; L – длина транспортирования, м; K_c – коэффициент сопротивления перемещению груза винтовой поверхностью; K_n – коэффициент, учитывающий инерцию; K_{ct} – коэффициент сопротивления от стоек зубьев.

Полная мощность привода шнекофрезерного рабочего органа погрузчика-смесителя равна сумме мощностей, рассчитанных по выражениям (16) и (17).

Анализ взаимодействия ковша машины для удаления грунта позволил построить дифференциальные уравнения, описывающие движение частицы грунта в каждом из трех возможных положений.

В положении I частица находится на передней или боковой кромке ковша и зажата между кромкой и слоем грунта:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = R_p - k_n d \delta d B \sigma_p - d A \sigma_{сж} - m v_x / t; \quad (18)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = T - mg - m a_y = T - m(g + v_y / t), \quad (19)$$

где R_p – сила сопротивления движению машины в первом положении, Н; T – сила реакции поверхности ковша, Н; B – ширина захвата рабочего органа, м; k_n – коэффициент, учитывающий изменение толщины режущей кромки из-за

налипания частиц грунта; $d\delta$ – элементарная толщина режущей кромки днища ковша, с помощью которой происходит отделение слоя от основного массива m ; dB – элементарная ширина режущей кромки, m ; σ_p – напряжение разрушения частиц тепличного грунта, с учетом тонкой режущей кромки его можно принять равным напряжению резания, Pa ; dA – элементарная площадь, m^2 ; $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия, Pa ; m – масса частицы, kg ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; a_y – проекция ускорения частицы на ось OY , m/c^2 ; v_x, v_y – проекции поступательной скорости машины v_M на оси OX и OY соответственно, m/c ; t – длительность взаимодействия при отделении, s .

В положении II частица взаимодействует с наклонным днищем ковша и движется по его наклонной поверхности (рисунок 9):

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= M \cos \gamma - gm f_n \cos \gamma - mv_x / t - N \sin \gamma = \\ &= M \cos \gamma - N \sin \gamma - m(g f_n \cos \gamma + v_x / t); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} m \frac{d^2y}{dt^2} &= N \cos \gamma + M \sin \gamma - gm f_n \sin \gamma - gm - mv_y / t = \\ &= N \cos \gamma + M \sin \gamma - m(g f_n \sin \gamma + g + v_y / t), \end{aligned} \quad (21)$$

где N – сила реакции поверхности ковша, H ; M – сила реакции частиц перед рассматриваемой частицей, H ; f_n – коэффициент трения по поверхности ковша; γ – угол наклона днища ковша к горизонтали, град.

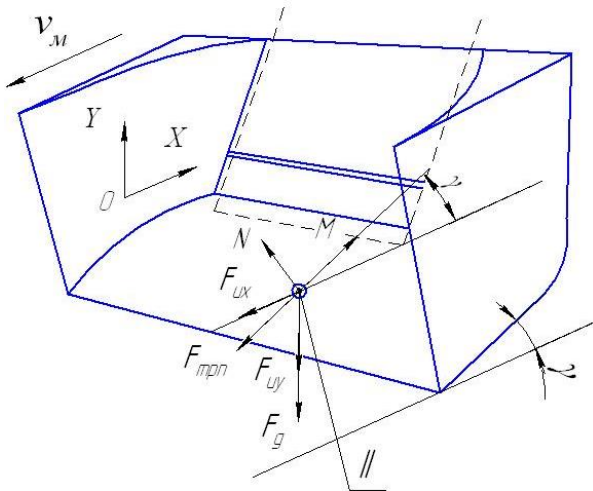


Рисунок 9 – Схема сил, действующих на частицу в положении II

В положении III частица грунта взаимодействует с боковой поверхностью отвала и с наклонной поверхностью ковша через слой грунта:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = P + ab\sigma_{\text{сж}} \sin \theta - R_b \sin \theta - (ab\sigma_{\text{сж}} + mv_z \cos \theta / t) f_{\text{п}} \cos \theta - mv_x / t - N \sin \gamma; \quad (22)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = N \cos \gamma - mg - mv_y / t = N \cos \gamma - m(g + v_y / t); \quad (23)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = R_b \cos \theta - mv_z / t - (ab\sigma_{\text{сж}} + mv_z \cos \theta / t) f_{\text{п}} \sin \theta - ab\sigma_{\text{сж}} \cos \theta, \quad (24)$$

где P – сила реакции частицы, Н; a , b – стороны прямоугольника, образованного нормальным сечением слоя грунта, м; θ – угол между осью OX и действующей силой трения о боковую поверхность отвала (направлена по касательной к боковой поверхности в точке касания частицы), град.; R_b – составляющая силы сдвига, направленной по нормали к боковой поверхности отвала, Н; v_z – проекция поступательной скорости машины v_M на ось OZ , м/с.

Для нахождения усилия, преодолеваемого машиной, необходимо решить систему уравнений (19)–(24) относительно суммарного сопротивления движению машины в каждом из положений.

В I положении:

$$R_p = Bhl_0v_M / t + k_{\text{л}}\delta B\sigma_p + Bhn_p\sigma_{\text{сж}}, \quad (25)$$

где R_p – сила сопротивления движению машины, Н; B – ширина захвата рабочего органа, м; h – высота отделяемого слоя грунта, м; l_0 – длина взаимодействующей части слоя, м; v_M – скорость машины, м/с; $k_{\text{л}}$ – коэффициент, учитывающий изменение толщины режущей кромки из-за налипания частиц грунта; δ – элементарная толщина режущей кромки днища ковша, м; n_p – количество поверхностей разрушения.

Во II положении:

$$M = m \frac{v_x}{t \cos \gamma} - N \operatorname{tg} \gamma + mgf_{\text{п}}; \quad (26)$$

$$N = \frac{m \frac{v_y}{t} - (m \frac{v_x}{t \cos \gamma} + mgf_{\text{п}}) \sin \gamma + m(gf_{\text{п}} \sin \gamma + g)}{\cos \gamma (1 - \sin^2 \gamma)}. \quad (27)$$

В III положении:

$$P = m \frac{v_x}{t} - ab\sigma_{\text{сж}} \cos \theta + R_b \sin \theta - ab\sigma_{\text{сж}} f_{\text{п}} \sin \theta; \quad (28)$$

$$R_b = m \frac{v_z}{t \sin \theta} + ab\sigma_{\text{сж}} f_{\text{п}} \operatorname{ctg} \theta - ab\sigma_{\text{сж}}. \quad (29)$$

Выражения (25)–(29) связывают усилия взаимодействия с основными параметрами рабочих органов и физико-механическими свойствами тепличного грунта и его компонентов.

Суммарная мощность машины – сумма всех мощностей, затрачиваемых на преодоление сопротивлений по всем осям. Проведя соответствующие преобразования, получим:

$$\Sigma P = (R_p + M \cos \gamma + P + N \operatorname{tg} \gamma + R_b \operatorname{tg} \theta_{\text{ср}}) v_m, \quad (30)$$

где $\theta_{\text{ср}}$ – средний угол боковой поверхности отвала, град.; v_m – поступательная скорость машины, м/с.

Теоретическими исследованиями для каждой из машин установлена зависимость производительности от конструктивных и режимных параметров.

Производительность Q_y комбинированного укладчика:

$$Q_y = K_3 b_{\text{ск}} h_{\text{ск}} \rho_k v_c + \frac{\rho_{\text{к1}} K_{31} \alpha_{\text{п1}} B_{\text{п1}} z_{\text{п1}} n_{\text{к1}} (D_{\text{н1}}^2 - D_{\text{в1}}^2)}{8} + \frac{\rho_{\text{к2}} K_{32} \alpha_{\text{п2}} B_{\text{п2}} z_{\text{п2}} n_{\text{к2}} (D_{\text{н2}}^2 - D_{\text{в2}}^2)}{8}, \quad (31)$$

где K_3 – коэффициент заполнения межскребкового пространства; $b_{\text{ск}}$, $h_{\text{ск}}$ – ширина и высота скребка, м; ρ_k – средняя плотность компонента в первом бункере, кг/м³; v_c – скорость цепи транспортера, м/с; $\rho_{\text{к1}}$, $\rho_{\text{к2}}$ – средняя плотность компонента в бункере первого и второго барабана соответственно, кг/м³; K_{31} и K_{32} – коэффициент заполнения пространства между планками первого и второго барабана; $\alpha_{\text{п1}}$, $\alpha_{\text{п2}}$ – угол между планками первого и второго барабана, град.; $B_{\text{п1}}$, $B_{\text{п2}}$ – ширина планки первого и второго барабана, м; $z_{\text{п1}}$, $z_{\text{п2}}$ – число лопаток на первом и втором барабанах, шт.; $n_{\text{к1}}$, $n_{\text{к2}}$ – частота вращения первого и второго дозирующих барабанов, с⁻¹; $D_{\text{н1}}$, $D_{\text{н2}}$ – наружный диаметр первого и второго дозирующего барабана, м; $D_{\text{в1}}$, $D_{\text{в2}}$ – внутренний диаметр первого и второго дозирующего барабана, м.

Производительность $Q_{\text{п}}$ погрузчика-смесителя для смеси, состоящей из n компонентов, при количестве зубьев z , одновременно выполняющих отделение, с учетом коэффициента их влияния K_z :

$$Q_n = (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \dots + \rho_n V_n) / t = (\rho_1 B_3 \frac{v\pi(y_2 - y_1)}{2\omega} + \rho_2 B_3 \frac{v\pi(y_3 - y_2)}{2\omega} + \dots + \rho_n B_3 \frac{v\pi(y_{n+1} - y_n)}{2\omega}) z K_z / t, \quad (32)$$

где $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – плотность 1-го, 2-го, ... n -го компонента, кг/м³; V_1, V_2, \dots, V_n – отделяемый объем 1-го, 2-го, ... n -го компонента, м³; t – время прохождения зуба через все n компонентов почвенной смеси, с; B_3 – ширина зуба, м; y_1, y_2, \dots, y_n – верхние границы слоев n -го компонента; ω – угловая скорость вращения рабочего органа погрузчика, рад/с.

Производительность $Q_{уд}$ машины для удаления и погрузки грунта:

$$Q_{уд} = \left(1 - \sin^2 \beta - \left(1 - \frac{2b}{B} \right) \frac{l_{бпо}}{l_{от}} - \frac{h_p}{h} \right) \rho B h v, \quad (33)$$

где β – угол наклона поверхности ковша, град.; b – ширина боковой поверхности отвала, м; B – ширина захвата ковша, м; $l_{бпо}$ – длина проекции боковой поверхности отвала, измеренная по направлению движения почвы, м; $l_{от}$ – длина боковой поверхности отвала по образующей, м; h, h_p – заданная и остаточная высота удаляемого слоя почвы, м; ρ – плотность убираемой почвы, кг/м³; v – скорость движения машины, м/с.

Для каждой из рассматриваемых машин установлено значение энергоемкости (Дж/кг). В общем случае энергоемкость E : $E = P/Q$, где P – суммарная мощность привода, Вт; Q – производительность машины, кг/с.

Энергоемкость укладки компонентов тепличного грунта комбинированным укладчиком E_y (Дж/кг):

$$E_y = \frac{\left[\left\{ \left(K_{сд} l_{сд} b_{сд} \tau_{сд} + g \rho_{к} l_{сд} b_{сд} h_{к} f_{вн} + g \rho_{к} l_{сд} b_{сд} h_{кп} f_{н} + m \frac{v_c}{t} \right) \frac{l_{тп}}{l_{сд}} + \sigma_{к} b_{сд} h_{ок} \right\} v_c + \right.}{\left[K_3 b_{сд} h_{сд} \rho_{к} v_c + \frac{\rho_{к1} K_{31} \alpha_{н1} B_{н1} z_{н1} n_{к1} (D_{н1}^2 - D_{в1}^2)}{8} + \frac{\rho_{к2} K_{32} \alpha_{н2} B_{н2} z_{н2} n_{к2} (D_{н2}^2 - D_{в2}^2)}{8} \right]} \quad (34)$$

Энергоемкость процесса смешивания компонентов и погрузки готового грунта $E_{пс}$ (Дж/кг):

$$E_{nc} = \frac{\left[\frac{\pi z_3 D_p n}{16} \sigma_p b B_3 \sin \left(\varphi_{cp} + \frac{\gamma}{2} \right) \frac{\theta}{180} + 2gn(\rho_1 B_3 \frac{v\pi(y_2 - y_1)}{2\omega} + \rho_2 B_3 \frac{v\pi(y_3 - y_2)}{2\omega} + \rho_3 B_3 \frac{v\pi(y_4 - y_3)}{2\omega}) z K_z L K_c K_n K_{ct} \right]}{\left[2n(\rho_1 B_3 \frac{v\pi(y_2 - y_1)}{2\omega} + \rho_2 B_3 \frac{v\pi(y_3 - y_2)}{2\omega} + \rho_3 B_3 \frac{v\pi(y_4 - y_3)}{2\omega}) z K_z \right]} \quad (35)$$

Энергоемкость удаления слоя почвы предлагаемой машиной E_{yd} (Дж/кг):

$$E_{yd} = \frac{(R_p + M \cos \gamma + P + N \operatorname{tg} \gamma + R_b \operatorname{tg} \theta_{cp}) v_m}{(1 - \sin^2 \beta - (1 - \frac{2b}{B}) \frac{l_{\text{бю}}}{l_{\text{от}}} - \frac{h_p}{h}) \rho} \quad (36)$$

В третьей главе «Программа и методы экспериментальных исследований» изложены задачи, общие принципы и методы проведения экспериментальных исследований рабочих органов технологических машин.

В состав тепличного грунта входят компоненты, существенно различающиеся физико-механическими свойствами. Для исследования были выбраны широко распространенные компоненты – чернозем, торф, перепревший и полуперепревший навоз, лузга, древесные опилки и минеральные удобрения (аммиачная селитра, аммофос, суперфосфат). При смешивании указанных материалов (в зависимости от заданного состава) образуется тепличный грунт, физико-механические свойства которого отличаются от исходных свойств каждого компонента и варьируются в зависимости от количества (объема) материала в готовой смеси. К основным свойствам относятся плотность, коэффициенты внешнего и внутреннего трения, сопротивление разрыву, сдвигу, сжатию, резанию. Изучение данных свойств проводили по известным методикам.

Кроме этого проведены исследования некоторых технологических параметров. Качество укладки компонентов (равномерность распределения их по площадке) оценивали среднеквадратичной неравномерностью высоты укладываемого слоя и определяли на специальной регулировочной площадке путем произведения контрольных срезов уложенных слоев компонентов через равные расстояния.

Для оценки качества смешивания используют коэффициент смешивания K , характеризующий равномерность смешивания компонентов, т. е. равномерность содержания определенного компонента в различных точках готового грунта. О гомогенности многокомпонентной смеси можно судить по равномерности распределения в ней одного-двух ключевых компонентов. В качестве такого компонента в исследовании использовали опилки. В процессе приготовления грунта производили отбор заданного количества проб и их последующую обработку – ключевой компонент выделяли из пробы и устанавливали его процентное содержание в каждой пробе.

Урожайность тепличных культур напрямую зависит от влагоёмкости и воздухоёмкости готового грунта. Ввиду технической сложности данные показатели

определяли в лаборатории тепличного комбината АО «Совхоз – Весна» (Саратовская обл.) на основе отобранных проб после каждого прохода машины.

Экспериментальные исследования выполняли на опытных образцах технологических машин, оснащенных комплексом тензометрической измерительной аппаратуры (рисунок 10).



а



б



в

Рисунок 10 – Опытные образцы технологических машин: *а* – комбинированный укладчик; *б* – погрузчик-смеситель; *в* – машина для удаления и погрузки грунта

Исследования проводили с использованием методов планирования эксперимента, физического и математического моделирования. Опытные образцы были оснащены тензометрической аппаратурой с программным обеспечением, позволяющим выводить результаты на компьютер. Тензометрированием измеряли крутящие моменты T (Н·м) на валах привода рабочих органов, а также усилия в элементах конструкции с поступательным движением F (Н). Для этого на соответствующих деталях (тензовеньях) наклеивали тензометрические датчики. Тензометрические звенья тарировали в соответствии с инструкциями и методиками. Также фиксировали частоту вращения валов. Поступательную скорость определяли замером пути и времени его прохождения. На основании полученных значений рассчитывали мощность.

При оценке производительности определяли массу грунта или его компонентов и время, за которое выполняли укладку, смешивание, удаление. Критериями оптимизации в экспериментальных исследованиях являлись производительность, мощность привода, энергоёмкость, а также равномерность укладки, степень смешивания компонентов, воздухоёмкость и влагоёмкость получаемого тепличного грунта.

В четвертой главе «*Результаты экспериментальных исследований*» изложены результаты экспериментальных исследований рабочих органов предлагаемых технологических машин.

При проведении экспериментальных исследований были определены физико-механические и технологические свойства составляющих компонентов и готового тепличного грунта. Получены значения плотности, коэффициентов трения, сопротивления резанию, сопротивление сжатию. Тепличный грунт, состоящий из 60 % чернозема, 20 % опилок, 20 % перепревшего навоза, имеет плотность $0,6...0,7$ кг/м³; коэффициент трения по металлу $0,65...0,8$; сопротивление сжатию $0,047$ кПа; сопротивление резанию $0,029$ кПа. Тепличный грунт, состоящий из полуперепревшего навоза, песка, опилок и торфа в равных соотношениях, имеет плотность $0,75...0,8$ кг/м³; коэффициент трения по металлу $0,9...1,0$; сопротивление сжатию $0,061$ кПа; сопротивление резанию $0,038$ кПа.

Результаты исследований производительности укладки комбинированным укладчиком представлены в виде уравнений регрессии и поверхностей (рисунок 11).

Уравнения регрессии имеют вид:

$$Q = -1,863 + 1,163\omega + 0,715N - 0,087\omega^2 - 0,004N\omega - 0,055N^2; \quad (37)$$

$$Q = -29,53 + 101,815v_{\text{ц}} + 8,521N_{\text{с}} - 146,25v_{\text{ц}}^2 - 0,37v_{\text{ц}}N_{\text{с}} - 0,534N_{\text{с}}^2. \quad (38)$$

Адекватность описания уравнений регрессии проверяли по критерию Фишера.

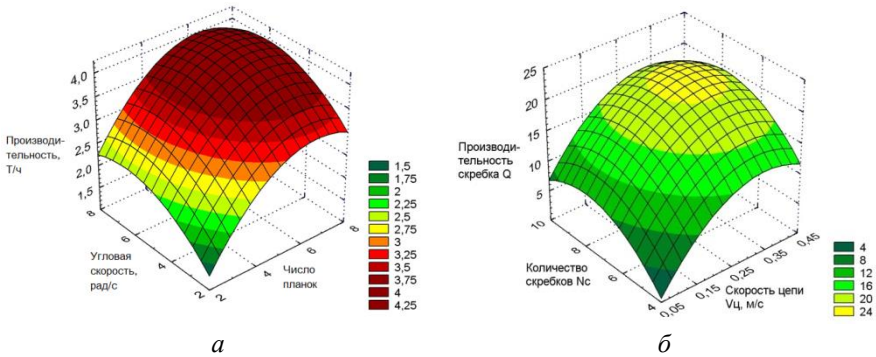


Рисунок 11 – Зависимость производительности укладки компонентов грунта комбинированным укладчиком: *а* – от угловой скорости (ω , рад/с) и числа планок (N , шт.) дозирующего барабана; *б* – от скорости цепи ($v_{ц}$, м/с) и количества скребков (N_c , шт.) цепного транспортера

Анализ зависимости (37) показывает, что с увеличением исследуемых факторов производительность возрастает до определенного значения, затем начинает снижаться (см. рисунок 11, *а*). Максимального значения она достигает при угловой скорости барабанов 6,0...6,5 рад/с и при 6 симметрично установленных планках (через 60 град.).

Сечение двухмерной поверхности (см. рисунок 11, *б*), соответствующей уравнению (38), имеет вид обратной параболы.

Область исследуемых параметров, при которых производительность имеет максимальное значение, соответствует $v_{ц} = 0,33...0,37$ м/с и количеству скребков 6–8. При больших значениях производительность снижается, что связано с уменьшением пропускной способности.

Для погрузчика-смесителя исследовали влияние на производительность режимных параметров – поступательной скорости машины и частоты вращения рабочего органа, а также конструктивных параметров – формы и количества режущих зубьев.

Производительность при криволинейной форме зубьев несколько больше, чем при другой форме (рисунок 12). Это позволяет уменьшить радиальное расстояние между наружной кромкой шнека и кожухом. Указанное расстояние увеличивается при других формах зубьев, что обуславливает некоторое снижение скорости осевого перемещения материала, чем и объясняется снижение производительности.

Изменение производительности от частоты вращения шнекофрезерного рабочего органа и числа зубьев описывается зависимостью:

$$Q = 0,303363n - 0,00057287n^2 + 0,25694z - 0,0087963z^2 - 4,59939. \quad (39)$$

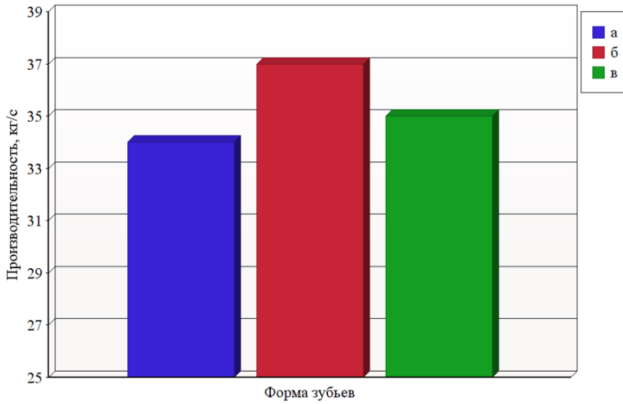


Рисунок 12 – Производительность погрузчика-смесителя с различной формой зубьев: *a* – треугольная при установке перпендикулярно радиусу шнека; *б* – криволинейная в виде сферического треугольника; *в* – треугольная при установке под углом наклона к радиусу

Производительность достигает максимального значения при частоте вращения $285 \dots 315 \text{ мин}^{-1}$ (рисунок 13). Увеличение частоты приводит к эффекту обратного перебрасывания за счет центробежных сил и сил трения и к снижению производительности. Максимальная производительность наблюдается при наибольшем количестве зубьев, работающих без перекрытия, – 22–24 шт. при ширине захвата 1,8 м.

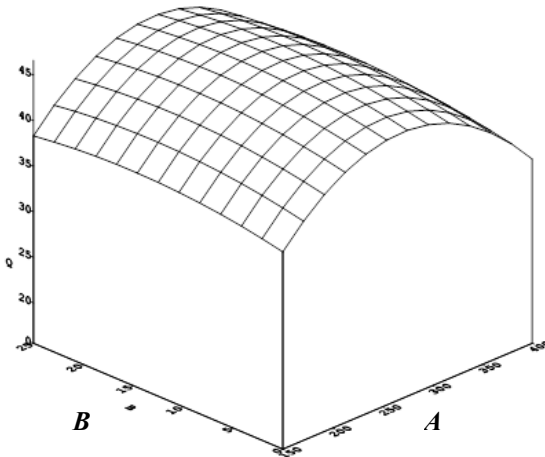


Рисунок 13 – Зависимость производительности погрузчика-смесителя (Q , кг/с) от частоты вращения рабочего органа (n , мин^{-1}) – фактор A и количества зубьев (z , шт.) – фактор B

Для машины, предназначенной для удаления тепличного грунта, исследовали совместное влияние на производительность высоты слоя почвы h ; поступательной скорости v машины; угла наклона γ поверхности отвала. В результате обработки данных получены уравнения регрессии и соответствующие поверхности отклика (рисунок 14).

Уравнения регрессии имеют вид:

$$Q = 0,052 + 35,068v + 0,01h - 108,854v^2 + 0,26vh + 5,195 \cdot 10^{-5} h^2; \quad (40)$$

$$Q = -8,175 + 71,25v + 0,802\gamma - 104,176v^2 - 0,467v\gamma - 0,016\gamma^2. \quad (41)$$

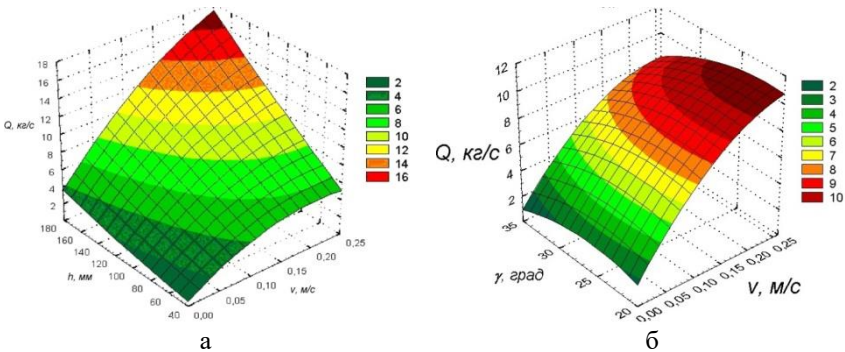


Рисунок 14 – Зависимость производительности машины для удаления тепличного грунта: *а* – от высоты слоя грунта (h , мм) и поступательной скорости (v , м/с); *б* – от угла наклона поверхности отвала (γ , град.) и поступательной скорости (v , м/с)

Влияние высоты слоя и поступательной скорости на производительность имеет практически линейный характер и возрастает при всех значениях поступательной скорости (см. рисунок 14, *а*). Однако дальнейшее увеличение указанных факторов приводит к перегрузке отгрузочного транспортера, в результате чего рост производительности замедляется и затем полностью прекращается.

Аналитическое решение уравнения (41) показывает область оптимума по углу наклона $\gamma = 22 \dots 24$ град. (см. рисунок 14, *б*). Производительность составила 16,4 кг/с при наибольшем значении поступательной скорости.

Для комбинированного укладчика установлена зависимость энергоемкости от скорости цепи и количества скребков:

$$E = 369,898 - 659,24V_{\text{ц}} - 23,045N_{\text{с}} + \\ + 1328,423V_{\text{ц}}^2 - 4,873V_{\text{ц}}N_{\text{с}} + 2,134N_{\text{с}}^2 \quad (42)$$

и от угловой скорости дозирующих барабанов и количества планок:

$$E = 2,3 + 0,3\omega - 0,652N - 0,0001562\omega^2 - 0,006N\omega + 0,035N^2. \quad (43)$$

Рост угловой скорости приводит к росту энергоемкости с разной интенсивностью при разном числе планок, что связано с переполнением пространства между планками и, соответственно, с ростом сопротивлений с увеличением скорости (рисунок 15, *а*). С увеличением количества планок пространство между ними заполняется в меньшей степени, и вращение барабана происходит с меньшими сопротивлениями.

Анализ поверхности отклика (рисунок 15, *б*) показывает, что существует область оптимальных значений: скорость движения скребков 0,31...0,34 м/с, количество скребков 6–7 для данной длины транспортера. Отклонение от этих значений приводит к росту энергоемкости.

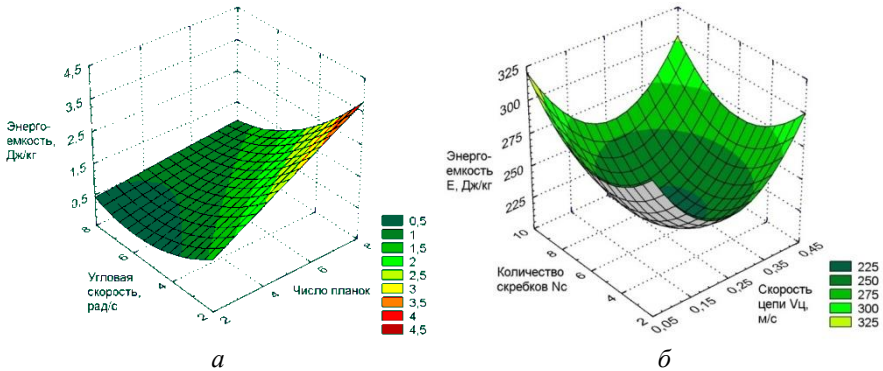


Рисунок 15 – Зависимость энергоемкости процесса укладки компонентов грунта комбинированным укладчиком: *а* – от угловой скорости (ω , рад/с) и количества планок (N , шт.) дозирующего барабана; *б* – от скорости цепи ($v_{ц}$, м/с) и количества скребков (N_c , шт.) цепного транспортера

Установлена зависимость энергоемкости рабочего органа погрузчика-смесителя от режимных параметров:

$$E = 46196v^{2,59} + 37,1|\omega - 7,91v - 4,199|^{2,06}. \quad (44)$$

Энергоемкость минимальна при значениях угловой скорости 4,5...5,5 рад/с (рисунок 16). Рабочее значение поступательной скорости – 0,1...0,12 м/с. Минимум функции достигается при $\omega = 7,91v + 4,199$. Энергоемкость при этом – $E = 46196v^{2,59}$.

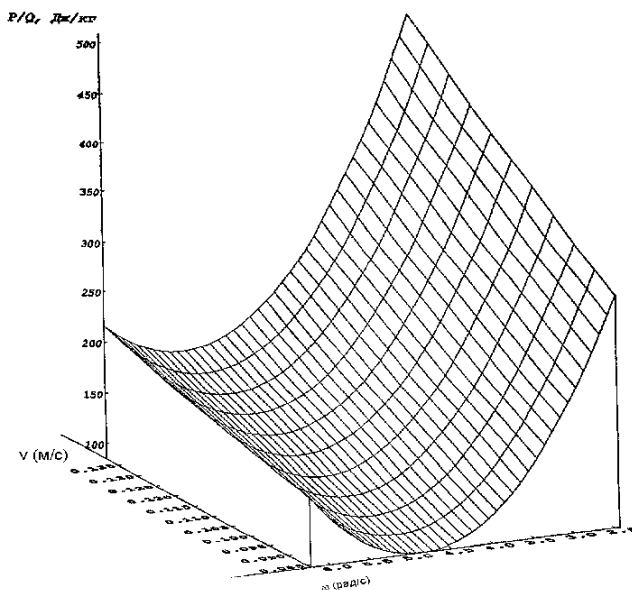


Рисунок 16 – Зависимость энергоёмкости шнекофрезерного рабочего органа погрузчика-смесителя (E , Дж/кг) от угловой скорости (ω , рад/с) и поступательной скорости машины (v , м/с)

Для машины, предназначенной для удаления грунта, установлена зависимость энергоёмкости от высоты слоя почвы и поступательной скорости:

$$E = 1648,127 - 2786,11v - 14,116h + 8923,61v^2 + 2,625vh + 0,051h^2 \quad (45)$$

и от угла наклона поверхности отвала и поступательной скорости машины:

$$E = 2107,39 - 2563,416v - 114,021\gamma + 8489,583v^2 - 3,3v\gamma + 2,342\gamma^2. \quad (46)$$

Все коэффициенты в модели (45) являются статистически значимыми, зависимость носит квадратичный характер с наличием области экстремума (рисунок 17, а).

Существуют значения, при которых энергоёмкость удаления грунта минимальна: поступательная скорость 0,12–0,17 м/с, высота удаляемого слоя 0,13–0,15 м, что соответствует высоте санитарного слоя в теплицах.

Анализ поверхности (см. рисунок 17, б) показывает, что существует область оптимальных значений, при которых энергоёмкость процесса минимальна: поступательная скорость 0,15–0,16 м/с, угол наклона поверхности отвала 24–25 град.

Проведены исследования по оценке неравномерности укладки компонентов комбинированным укладчиком (рисунок 18).

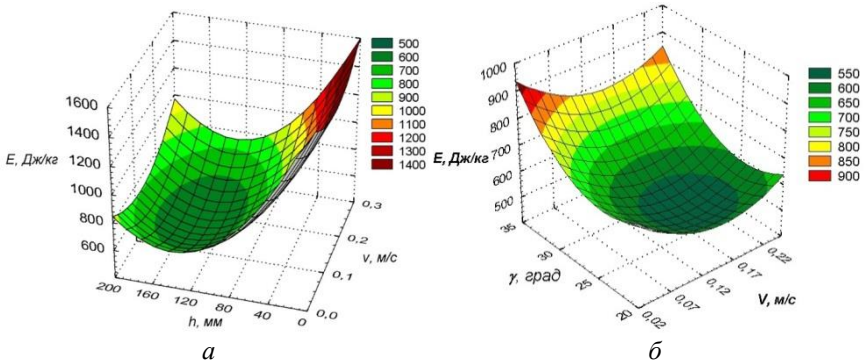


Рисунок 17 – Зависимость энергоёмкости машины для удаления тепличного грунта: *а* – от высоты слоя грунта (h , мм) и поступательной скорости (v , м/с); *б* – от угла наклона поверхности отвала (γ , град.) и поступательной скорости (v , м/с)

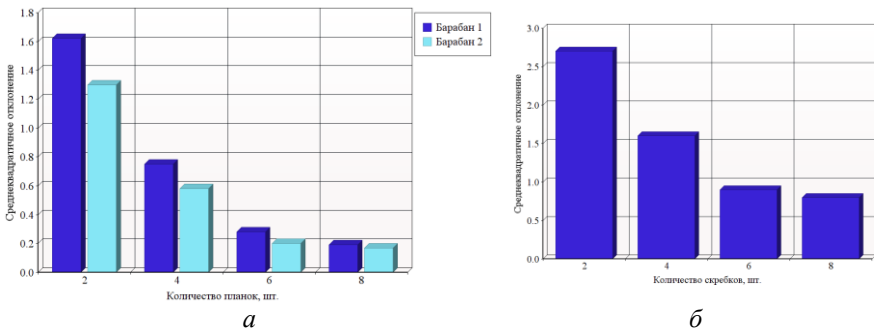


Рисунок 18 – Диаграммы зависимости среднеквадратичного отклонения высоты уложенного слоя компонента комбинированным укладчиком: *а* – от количества планок первого и второго дозирующих барабанов; *б* – от количества срежков

Сравнительная оценка неравномерности позволяет определить оптимальные режимные и конструкционные параметры рабочих органов комбинированного укладчика. Расчетом среднеквадратичного отклонения высоты слоев компонентов грунта получены диаграммы (см. рисунок 18). При параметрах, соответствующих максимальной производительности, среднеквадратичное отклонение высоты слоев составляет менее 5 %, чем обеспечивается требуемое качество укладки.

Для погрузчика-смесителя уставлено влияние формы зубьев на показатели эффективности приготовления тепличного грунта – коэффициент степени смешивания, влагоёмкость и воздухоёмкость. Наибольшая степень смешивания компонентов почвы достигается при криволинейной форме, которая

обеспечивает лучшее крошение массива и смешивание до вступления в работу винтовой поверхности шнека (рисунок 19). Коэффициент смешивания составил $0,94 \dots 0,96$, что выше агротехнических требований ($0,90 \dots 0,95$).

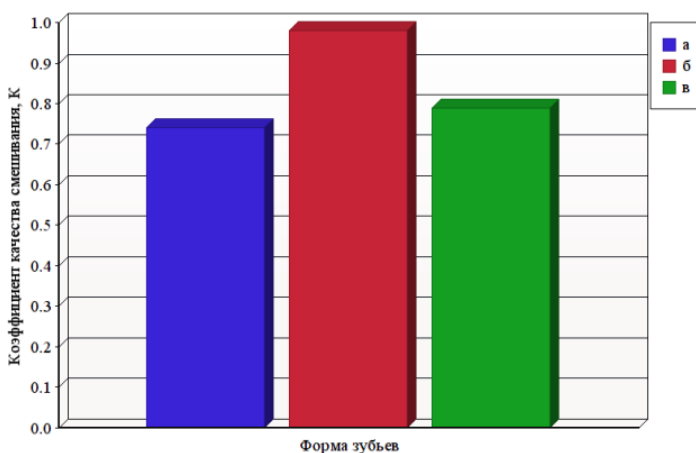


Рисунок 19 – Диаграмма зависимости коэффициента качества смешивания компонентов тепличного грунта от формы зубьев: *а* – треугольная при установке перпендикулярно радиусу шнека; *б* – криволинейная в виде сферического треугольника; *в* – треугольная при установке под углом наклона к радиусу

Экспериментально установлено влияние количества зубьев и частоты вращения рабочего органа погрузчика-смесителя на воздухоёмкость, влагоёмкость и коэффициент смешивания готового грунта. Получены уравнения регрессии и построены поверхности отклика.

Зависимость влагоёмкости от частоты вращения и количества зубьев:

$$W_1 = 0,020706A + 0,000031333A^2 + 0,341666B + 0,0083333B^2 + 33,55472. \quad (47)$$

На рисунке 20 представлена поверхность отклика, отражающая зависимость (47).

Установленная агротехническими требованиями влагоёмкость для тепличного грунта составляет 45–50 %. Она достигается при числе зубьев более 12 и частоте вращения более 250 мин^{-1} .

Достоверность результатов исследований подтверждена их сходимостью. Оценку расхождения между экспериментальными и теоретическими данными проводили с помощью вычисления среднеквадратичного отклонения во всех точках плана эксперимента (для наших условий не превышает предельного отклонения 5 %) для производительности и энергоёмкости каждой машины. На рисунке 21 представлен график зависимости энергоёмкости цепного транспортера комбинированного укладчика от скорости движения цепи.

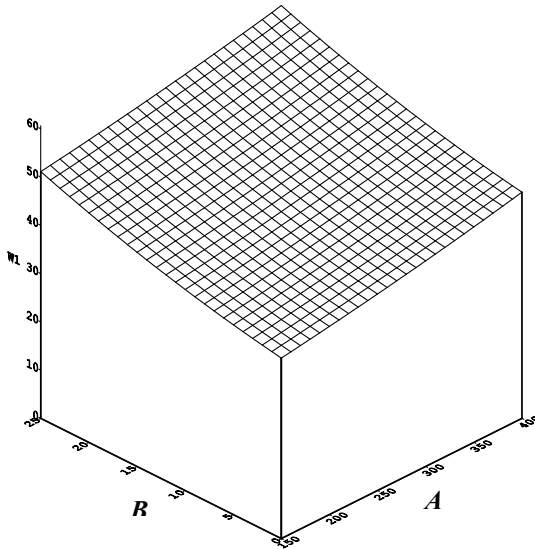


Рисунок 20 – Влияние частоты вращения рабочего органа погрузчика-смесителя (n , мин^{-1}) – фактор A и количества зубьев (z , шт.) – фактор B на величину влагоёмкости (W_1 , %) готового грунта

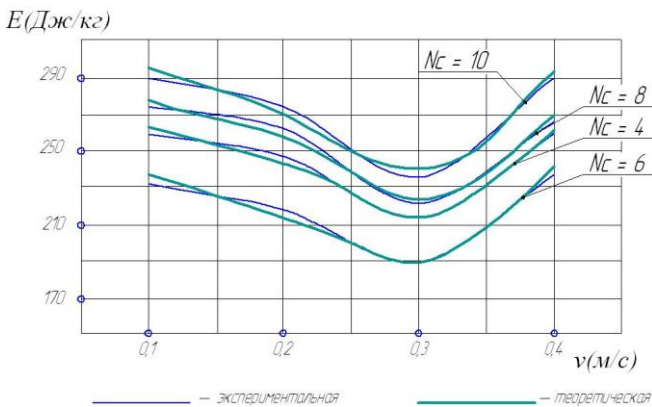


Рисунок 21 – Сходимость теоретической и экспериментальной зависимостей энергоёмкости цепного транспортера комбинированного укладчика от скорости движения цепи при различном количестве скребков

Аналогично рассчитана сходимость энергоёмкости дозирующего барабана в зависимости от количества планок при различной угловой скорости.

На рисунке 22 представлен график сходимости производительности машины для удаления и погрузки грунта из теплиц в зависимости от скорости поступательного движения при различной высоте удаляемого слоя.

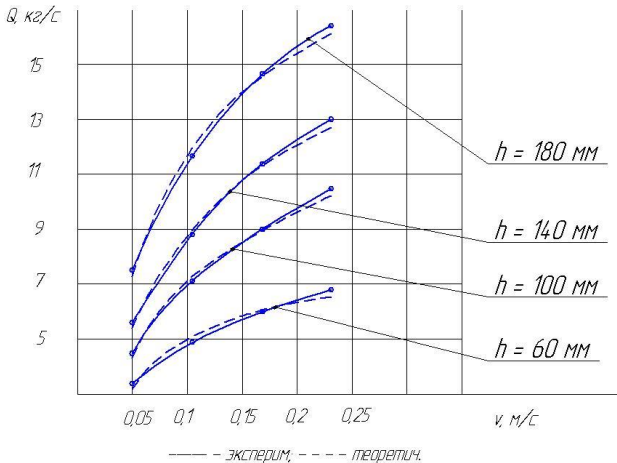


Рисунок 22 – Сходимость теоретической и экспериментальной зависимостей производительности машины для удаления и погрузки грунта от скорости поступательного движения при различной высоте удаляемого слоя

Анализ полученных зависимостей подтверждает установленный характер изменения указанных критериев оптимизации от исследуемых факторов.

Аналитические зависимости, полученные теоретически, подтверждены экспериментально и сходятся с ними во всех точках. Расхождение не превышает 5 %.

В пятой главе **«Результаты производственных испытаний и технико-экономическая оценка применения разработанных машин»** представлены результаты внедрения предлагаемого комплекса машины, состоящего из комбинированного укладчика, погрузчика-смесителя и машины для удаления грунта. Машины имели значения параметров и режимов, установленные в ходе исследований. Приведены также результаты расчетов технико-экономической эффективности применения результатов исследований в производстве.

Предложенная технологическая схема приготовления и использования тепличного грунта позволила исключить затраты ручного труда, что снизило прямые затраты на 41,1 %. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии по сравнению с существующей составил 570178 руб. в ценах на 01.11.2021, а срок окупаемости – 1,2 года. Расчет по математической модели (3) показал, что полные энергетические затраты при новой технологии сокращаются в 6,85 раза, суммарное снижение затрат труда – 5,1 раза, снижение материалоемкости – 2,45 раза. Суммарная эффективность предлагаемой технологии по сравнению с существующей с учетом дополнительных капиталовложений возрастает в 1,54 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие тепличного производства сдерживается высокой трудоемкостью и энергоемкостью работ по приготовлению, укладке тепличного грунта и последующего его удалению. Проблема ресурсосбережения в указанных технологических процессах может быть решена за счет разработки технических средств с оптимальными, научно обоснованными конструктивно-режимными параметрами рабочих органов. Предлагаемые схемы машин (комбинированный укладчик, погрузчик-смеситель, оснащённый шнекофрезерным рабочим органом, машина для удаления и погрузки слоя грунта), используемые в ресурсосберегающей технологии и имеющие установленные проведенными исследованиями параметры, позволяют достичь общего экономического эффекта 570178 руб., снижения прямых затрат на 41 % при сроке окупаемости дополнительных капиталовложений 1,2 года. Суммарная эффективность предлагаемой технологии по сравнению с существующей с учетом дополнительных капиталовложений возрастает в 1,54 раза.

1. Анализ существующих технологических схем приготовления и использования тепличного грунта и конструктивно-технологических схем применяемых в них технических средств показал, что все процессы выполняют последовательно как отдельные операции. При этом трудоемкость и энергоемкость работ высоки. Одна из основных причин такого положения – отсутствие специализированных машин с рабочими органами, адаптированными к условиям тепличного производства. Применяемые технические средства из других отраслей сельскохозяйственного производства не учитывают особенности приготовления и использования тепличного грунта. Вследствие этого рабочие органы имеют параметры, не соответствующие оптимальным значениям. Отсутствие научного обоснования ресурсосберегающих и высокопроизводительных технических средств с оптимальными конструктивно-режимными параметрами рабочих органов является причиной возникновения проблемы обеспечения эффективности технологических процессов приготовления и использования тепличного грунта.

2. На основе проведенного анализа и сформулированной научной гипотезы разработаны технология приготовления и использования тепличного грунта, модель оценки ее эффективности, учитывающая производительность, энергоемкость, материалоемкость процесса и качественные показатели тепличного грунта. Для реализации предложенной технологии разработаны конструктивно-технологические схемы машин: комбинированный укладчик (патент на полезную модель № 211840); погрузчик-смеситель (патент на полезную модель № 119337), оснащённый шнекофрезерным рабочим органом (патент на полезную модель № 117906) и зубьями с режущими поверхностями специальной формы; машина для удаления и погрузки слоя грунта после использования (патент на изобретение № 2621041), адаптированные к физи-

ко-механическим свойствам компонентов тепличного грунта и обеспечивающие ресурсо- и энергосбережение.

3. В ходе теоретических исследований получены математические модели взаимодействия отделяющих и транспортирующих рабочих органов с тепличным грунтом. Представлены математическое описание и аналитические зависимости, характеризующие влияние всей суммы факторов на производительность, мощность и энергоёмкость процессов укладки компонентов, смешивания и удаления тепличного грунта.

Основное влияние на силовые взаимодействия и приводную мощность оказывают поступательная скорость машин, угловая скорость рабочих органов, конструктивные параметры элементов, взаимодействующих с тепличным грунтом, и его физико-механические свойства. Определены оптимальный угол при вершине зуба шнекофрезерного питателя – 110 град., угол заточки режущей кромки – 60 град., угол наклона ковша машины для удаления и погрузки слоя грунта – 20...25 град. Производительность рабочих органов с вращательным движением связана с режимными параметрами и диаметром рабочего органа степенной функцией. Для рабочих органов с поступательным движением зависимость от конструктивных и режимных параметров в рабочем диапазоне их значений является прямо пропорциональной. Энергоёмкость взаимодействия рабочих органов предложенных машин с тепличным грунтом определяется суммарным влиянием конструктивных, режимных параметров и физико-механических свойств на производительность и мощность. Влияние указанных факторов на энергоёмкость носит нелинейный характер и описывается уравнениями второго порядка. На основании анализа математических моделей получены рациональные значения энергоёмкости: для укладки компонентов тепличного грунта комбинированным укладчиком – 235 Дж/кг; для смешивания компонентов и погрузки тепличного грунта погрузчиком-смесителем – 170 Дж/кг; для процесса удаления тепличного грунта предлагаемой машиной – 510 Дж/кг.

4. В результате исследований определены физико-механические и технологические свойства составляющих компонентов и готового тепличного грунта. Тепличный грунт, состоящий из чернозема, опилок и перепревшего навоза, имеет плотность 0,6–0,7 кг/м³; коэффициент трения по металлу – 0,65–0,8; сопротивление сжатию – 0,047 кПа; сопротивление резанию – 0,029 кПа. Производительность технологических машин для приготовления и использования тепличного грунта имеет наибольшие значения при следующих конструктивно-режимных параметрах:

- для комбинированного укладчика наибольшая производительность составила 22,5 кг/с при угловой скорости приводной звездочки цепного транспортера 5 рад/с, количестве скребков 7, угловой скорости дозирующего барабана 6 рад/с и при числе планок 6;

- для погрузчика-смесителя наибольшая производительность 39 кг/с достигается при частоте вращения 290–300 мин⁻¹ шнекофрезерного рабочего органа диаметром 0,6 м и количестве зубьев 24;

- максимальная производительность машины для удаления грунта 16,4 кг/с обеспечивается при наибольших значениях поступательной скорости, высоты слоя и значении угла наклона рабочей поверхности ковша 22...24 град.

5. Установлены оптимальные значения конструктивных и режимных параметров, при которых достигается минимальная энергоёмкость процессов:

- для комбинированного укладчика – при скорости цепи транспортера 0,31–0,34 м/с энергоёмкость составляет 218 Дж/кг;

- для шнекофрезерного рабочего органа погрузчика-смесителя при угловой скорости 4,5–5,5 рад/с и поступательной скорости 0,1–0,12 м/с энергоёмкость 167 Дж/кг;

- рациональные по энергоёмкости значения поступательной скорости машины для удаления грунта и высоты удаляемого слоя грунта составляют соответственно 0,12–0,17 м/с и 0,13–0,15 м; оптимальный угол наклона поверхности отвала 24–25 град.; энергоёмкость 507 Дж/кг.

Отклонение исследуемых параметров от полученных значений приводит к росту энергоёмкости выполняемых процессов.

6. Анализ процесса укладки компонентов тепличного грунта позволил установить, что при параметрах, соответствующих максимальной производительности, среднеквадратичное отклонение высоты слоев составляет менее 5 %, что обеспечивает требуемое качество укладки. В результате исследований установлено, что наибольшую эффективность приготовления тепличного грунта с позиций технологических параметров обеспечивает шнекофрезерный рабочий орган, оснащенный режущими зубьями криволинейной формы в виде сектора цилиндрической поверхности при максимальном количестве зубьев, работающих без перекрытия зон резания. Коэффициент качества смешивания достигает 0,94–0,96. Влагоёмкость и воздухоёмкость – 51 % и 48 % соответственно.

7. Установлены значения основных технико-экономических показателей применения разработанной технологии и технических средств. От внедрения комбинированного укладчика экономический эффект составляет 156300 руб., срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – 1,8 года. Для погрузчика-смесителя годовой экономический эффект – 125998 руб., срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – 1,9 года. Для машины для удаления тепличного грунта годовой экономический эффект 287880 руб., срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – 2,4 года. Общий экономический эффект от внедрения ресурсосберегающей технологии 570178 руб., срок окупаемости – 1,2 года. Предлагаемая технология позволила снизить прямые затраты на 41 %. Суммарная эффективность предлагаемой технологии, рассчитанная по предложенной модели с учетом дополнительных капиталовложений, возрастает в 1,54 раза.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Предлагаемую ресурсосберегающую технологию приготовления и использования тепличного грунта целесообразно рекомендовать крупным и средним тепличным хозяйствам, использующим грунтовый способ выращивания растений.

Для снижения потерь компонентов тепличного грунта при его раскладке для последующего смешивания рекомендуется комбинированный укладчик (патент на полезную модель № 211840), обеспечивающий дозирование и равномерную укладку до трех компонентов тепличного грунта.

Для повышения качества смешивания и достижения требуемых технологических свойств тепличного грунта рекомендуется использовать погрузчик-смеситель (патент на полезную модель № 119337), оснащенный шнекофрезерным рабочим органом (патент на полезную модель № 117906).

Для полного или частичного удаления санитарного слоя рекомендуется машина для удаления и погрузки тепличного грунта (патент на изобретение № 2621041), обеспечивающая удаление слоя за один проход.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Для повышения качества смешивания и дозировки компонентов тепличного грунта перспективным направлением является создание автоматизированной системы контроля процесса дозирования подачи компонентов, а также автоматизированной информационной системы, отслеживающей в реальном времени технологические характеристики готового тепличного грунта: качество смешивания, воздухоёмкость, влагоёмкость.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

*В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК
Минобрнауки РФ*

1. Павлов, П. И. Погрузчик-смеситель почвы для теплиц / П. И. Павлов, С. Л. Медведев, **А. О. Везиров** // Сельский механизатор. – 2013. – № 9. – С. 40.
2. Павлов, П. И. Результаты исследований погрузчика-смесителя почвы для теплиц / П. И. Павлов, Г. В. Левченко, **А. О. Везиров** // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2013. – № 8. – С. 62–64.
3. **Везиров, А. О.** Экспериментальное исследование рабочих органов погрузчика-смесителя почвы для теплиц / А. О. Везиров // Научное обозрение. – 2013. – № 8. – С. 24–27.
4. Павлов, П. И. Комплекс машин для работы с почвой в тепличном производстве / П. И. Павлов, **А. О. Везиров**, А. В. Ракутина, Д. В. Мухин // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 7. – С. 51–53.
5. Павлов, П. И. Результаты экспериментальных исследований комбинированного укладчика почвенных компонентов для теплиц / П. И. Павлов, В. В. Корсак, **А. О. Везиров**, Д. В. Мухин // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 10. – С. 52–54.

6. Павлов, П. И. Исследование влияния конструктивных и режимных параметров комбинированного укладчика на мощность привода рабочих органов / П. И. Павлов, В. В. Корсак, **А. О. Везилов**, Д. В. Мухин // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 82–85.

7. Павлов, П. И. Обоснование параметров шнекового погрузчика-смесителя органоминерального компоста / П. И. Павлов, И. Л. Дзюбан, **А. О. Везилов** // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2019. – № 6 (94). – С. 4–9.

8. Павлов, П. И. Энергоемкость укладки почвенных компонентов комбинированным укладчиком для теплиц / П. И. Павлов, **А. О. Везилов**, Д. В. Мухин // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 3 (36). – С. 63–67.

9. Павлов, П. И. Оптимизация конструктивных и режимных параметров комбинированного укладчика почвенных компонентов / П. И. Павлов, **А. О. Везилов**, Д. В. Мухин // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 10. – С. 115–119.

10. Павлов, П. И. Результаты экспериментальных исследований прицепной машины для удаления и погрузки почвы в теплицах / П. И. Павлов, **А. О. Везилов**, В. В. Корсак, А. В. Левченко // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 12. – С. 97–99.

11. **Везилов, А. О.** Результаты экспериментальных исследований процесса удаления и погрузки почвы в теплицах / А. О. Везилов, П. И. Павлов, А. В. Левченко, В. В. Корсак // Нива Поволжья. – 2020. – № 3 (56). – С. 135–141.

12. **Везилов, А. О.** Влияние конструктивных и режимных параметров на силовые характеристики машины для удаления и погрузки тепличного грунта / А. О. Везилов, П. И. Павлов, А. В. Левченко, В. В. Корсак // Вестник Курганской ГСХА. – 2021. – № 4. – С. 97–99.

13. **Везилов, А. О.** Исследование производительности машин для работы с тепличным грунтом / А. О. Везилов // Наука в центральной России – Science in the Central Russia. – 2022. – № 5 (59). – С. 28–36.

14. **Везилов, А. О.** Исследование энергоёмкости машин для работы с тепличным грунтом / А. О. Везилов // Вестник АПК Верхневолжья. – 2022. – № 3 (59). – С. 65–73.

В научных изданиях, включённых в базу данных Scopus

15. Pavlov P. I. Mechanization of Soil Preparation for Greenhouses / P. I. Pavlov, E. E. Demin, R. R. Khakimzyanov, G. V. Levchenko, **A. O. Vezirov** // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – No. 3(9). – P. 1023–1030.

16. **Vezirov A. O.** The Study the Influence of the Parameters of the Operating Elements on the Technological Indicators of the Operation of the Greenhouse Soil Loader and Mixer / A. O. Vezirov, G. V. Levchenko, P. I. Pavlov, E. E. Demin // Advances in Dynamical Systems and Applications. – 2021. – No. 1(16). – P. 189–200.

17. **Vezirov A. O.** Investigation of the Interaction of the Working Bodies of the Soil Harvesting Machine with the Greenhouse Soil when Removing the Sanitary Layer / A. O. Vezirov, P. I. Pavlov, A. V. Levchenko // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2021. – No. 839(5). – P. 052050.

В авторских свидетельствах и патентах

18. Пат. 117906 Российская Федерация, МПК В 65 G 67/24. Рабочий орган погрузчика-смесителя / Павлов П. И., Левченко Г. В., **Везилов А. О.**, Дзюбан И. Л. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2012108283/11 ; заявл. 05.03.2012 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 3 с.

19. Пат. 119337 Российская Федерация, МПК В 65 G 65/22. Погрузчик-смеситель органоминерального компоста / **Везилов А. О.**, Дзюбан И. Л., Павлов П. И. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2012114293/11 ; заявл. 11.04.2012 ; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 4 с.

20. Пат. 2621041 Российская Федерация, МПК В 62 D 63/00. Прицепная машина для удаления и погрузки почвы в теплицах / Павлов П. И., **Везилов А. О.**, Левченко Г. В., Ракутина А. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2016100090 ; заявл. 11.01.2016 ; опубл. 31.05.2017, Бюл. № 3. – 4 с.

21. Пат. 211840 Российская Федерация, МПК А 01С 3/00 А 01 В 49/06. Комбинированный укладчик почвенных компонентов / Павлов П. И., **Везилов А. О.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2021128154 ; заявл. 27.09.2021 ; опубл. 24.06.2022, Бюл. № 18. – 4 с.

*В журналах, сборниках научных трудов,
материалах конференций и семинаров*

22. Павлов, П. И. Погрузчик-смеситель для тепличного субстрата / П. И. Павлов, Г. В. Левченко, **А. О. Везилов** // Инновации и актуальные проблемы техники и технологий : матер. Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных. – Саратов : ФГБОУ ВПО «СГТУ им. Гагарина Ю. А.», 2010. – Т. 2. – С. 91–92.

23. Левченко, Г. В. Физико-механические свойства насыпных грунтов, используемых в тепличном овощеводстве / Г. В. Левченко, **А. О. Везилов** // Матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию профессора В. Ф. Дубинина. – Саратов : КУБиК, 2010. – С. 113–116.

24. Левченко, Г. В. Классификация питателей погрузчиков-смесителей / Г. В. Левченко, **А. О. Везилов** // Матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию профессора В. Ф. Дубинина. – Саратов : КУБиК, 2010. – С. 113–116.

25. Павлов, П. И. Погрузчик-смеситель для тепличного субстрата / П. И. Павлов, Г. В. Левченко, **А. О. Везилов** // Сб. работ VI Саратовского салона изобретений, инноваций и инвестиций. – Саратов, 2011. – Ч. 1. – С. 165–166.

26. Левченко, Г. В. Физические свойства тепличных субстратов / Г. В. Левченко, **А. О. Везилов** // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. Междунар. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2012. – С. 147–149.

27. Павлов, П. И. Погрузчик-смеситель для тепличного овощеводства / П. И. Павлов, Г. В. Левченко, **А. О. Везилов** // Новые технологии и технические сред-

ства в АПК : междунар. конф., посвящ. 105-летию со дня рожд. проф. В. В. Красникова. – Саратов, 2013. – С. 141–143.

28. Павлов, П. И. Теоретическое исследование взаимодействия шнекового рабочего органа погрузчика-смесителя с компонентами органоминерального компоста / П. И. Павлов, **А. О. Везилов**, И. Л. Дзюбан // Научная мысль. – 2015. – № 3. – С. 131–134.

29. Павлов, П. И. Экспериментальное исследование работы погрузчика-смесителя органоминерального компоста / П. И. Павлов, **А. О. Везилов**, И. Л. Дзюбан // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства : сб. науч. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : ВНИИ МСХ, 2015. – С. 84–87.

30. Павлов, П. И. Комбинированный укладчик компонентов почвы для теплиц / П. И. Павлов, **А. О. Везилов**, Д. В. Мухин // Научная мысль. – 2016. – № 5. – С. 36–38.

31. Павлов, П. И. Использование комбинированного укладчика в технологической схеме приготовления органоминеральных смесей / П. И. Павлов, **А. О. Везилов**, Д. В. Мухин // Естественные и технические науки. – 2018. – № 11 (125). – С. 321–324.

32. **Везилов, А. О.** Комбинированный укладчик в технологическом процессе подготовки почвы для теплиц / А. О. Везилов, П. И. Павлов, Д. В. Мухин // Стратегия развития сельского хозяйства в современных условиях – продолжение научного наследия Листопада Г. Е., академика ВАСХНИЛ (РАСХН), доктора технических наук, профессора : сб. – Волгоград : ФГОУ ВПО «ВолГАУ», 2019. – С. 79–84.

33. Павлов, П. И. Исследование энергоемкости дозирующего барабана комбинированного укладчика / П. И. Павлов, **А. О. Везилов**, Д. В. Мухин // Естественные и технические науки. – 2019. – № 7 (133). – С. 202–205.

34. **Везилов, А. О.** Производительность погрузчика-смесителя почвы для теплиц, оснащенного шнекофрезерным рабочим органом / А. О. Везилов, П. И. Павлов // Сборник статей по итогам XV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : ФГОУ ВПО «ПГАУ», 2020. – С. 141–146.

35. **Везилов, А. О.** Теоретическое обоснование радиуса кривизны зубьев рабочего органа погрузчика-смесителя почвы для теплиц / А. О. Везилов, П. И. Павлов // Сборник научных статей по материалам IV Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : НИЦ «Вестник науки», 2020. – С. 39–43.

36. **Везилов, А. О.** Влияние конструктивных и режимных параметров на производительность машины для удаления и погрузки тепличного грунта / А. О. Везилов, П. И. Павлов, А. В. Левченко, В. В. Корсак // Естественные и технические науки. – 2021. – № 12 (163). – С. 332–334.

37. **Везилов, А. О.** Теоретическое исследование работы погрузчика-смесителя тепличного грунта, оснащенного шнекофрезерным рабочим органом / А. О. Везилов, П. И. Павлов, И. Л. Дзюбан // Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства : сб. статей VII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : ФГОУ ВО «ПГАУ», 2022. – С. 16–20.

38. **Везилов, А. О.** Влияние конструктивных и режимных параметров на качественные характеристики машины для удаления и погрузки тепличного грунта / А. О. Везилов // Естественные и технические науки. – 2022. – № 2 (165). – С. 263–265.

Подписано в печать

Формат 60×84 1/16

Печ. л. 2,0

Тираж 100

Заказ №

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ООО «Волга-Медиа». Юридический адрес: 410028, г. Саратов, ул. им. Черны-
шевского Н.Г., дом 153, оф 217. Фактический адрес: 410040, г. Саратов,
ул. Вишневая, д. 10.