

На правах рукописи



Егожев Аскер Артурович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВУХРОТОРНОЙ
САДОВОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРИСТВОЛЬНЫХ ПОЛОС
ПЛОДОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ТЕРРАСИРОВАННЫХ СКЛОНАХ**

Специальность 4.3.1 Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова» (ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ)

Научный руководитель: **Апажев Аслан Каральбиевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Алдошин Николай Васильевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», лаборатория почвообрабатывающих и мелиоративных машин, главный научный сотрудник
Дробот Виктор Александрович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, кафедра «Сопротивления материалов», заведующий кафедрой

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ (г. Волгоград)**

Защита состоится «18» декабря 2025 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, корпус факультета энергетики, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г., размещен на официальном сайте ВАК РФ <https://vak.gisnauka.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент
Самурганов Евгений Ерманекосович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Российской Федерации наиболее динамично развивающейся подотраслью сельского хозяйства является садоводство. За истекшие десятилетия в нашей стране отмечается существенный ежегодный ввод новых площадей под плодовые насаждения.

В условиях южных регионов России, имеющих благоприятный микроклимат для производства плодов, перспективным направлением является освоение и ввод в оборот склоновых земель под плодовые культуры.

Одной из ключевых задач для садоводческих хозяйств остается борьба с сорняками в приствольных зонах плодовых культур. Для этого используются разные методы, среди которых наиболее популярен механический - с применением садовых фрез. Производители сельхозтехники предлагают пловодческим предприятиям широкий ассортимент садовых фрез как российского, так и импортного производства, отличающихся конструктивными и технологическими особенностями. Опыт использования садовых фрез в равнинном садоводстве показал, что при встрече со штамбом дерева выдвижная секция отводится и часть площади остается необработанной. Чтобы покрыть всю площадь, нужно выполнить два прохода вдоль линии ряда, что невозможно обеспечить в условиях террасного садоводства, где подход к линии ряда имеется только с одной стороны: со стороны полотна террасы, а другая же сторона ограничивается откосом террасы.

В связи с этим, разработка новой конструктивно-технологической схемы двухроторной садовой фрезы, позволяющая эффективно обрабатывать приствольные полосы плодовых насаждений в террасном садоводстве за один проход вдоль линии ряда, является актуальной.

Исследования по данной теме проводились в период с 2020 г. по настоящее время по тематике НИР ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ и по заказу МСХ РФ по теме «Разработка высокопродуктивных экологически чистых техно-

логий и технических средств по уходу за плодовыми насаждениями в интенсивном горном садоводстве Кабардино-Балкарской республики» (номер государственной регистрации АААА-А19-119071290029-9).

Рабочая гипотеза: полное фрезерование площади вокруг штамба плодового дерева в условиях террасного садоводства может быть достигнуто путем определения оптимальных параметров и режимов работы двухроторной садовой фрезы за один проход при движении вдоль линии ряда.

Степень разработанности темы исследования. Для механической обработки приствольных полос плодовых насаждений есть целый ряд садовых фрез, обладающих конструктивно-технологическими отличиями. Общими недостатками для них являются двухкратный проход вдоль линии ряда плодовых насаждений, что приводит к снижению производительности и большому расходу топливо-смазочных материалов.

Значительный вклад в разработку и исследование почвообрабатывающих фрез внесли А. И. Завражнов, Ю. А. Утков, Л. А. Шомахов, Н. В. Алдошин, П. А. Догода, К. А. Манаенков, А. А. Цымбал, В. В. Бычков, И. Г. Смирнов, В.А. Дробот, А. С. Пронь, В. Г. Бросалин, Б. Ф. Тарасенко, Е. И. Трубилин, С. И. Камбулов, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов, Е. А. Полищук и многие другие.

Большой вклад в исследования по механизации террасного садоводства внесли ученые Северо-Кавказского научно-исследовательского института горного и предгорного садоводства.

Перспективными разработками ротационных почвообрабатывающих машин занимаются ведущие ученые Волгоградского ГАУ.

Настоящее исследование расширяет результаты предыдущих работ, обосновывая параметры и режимы функционирования двухроторной садовой фрезы, которые позволяют достичь высококачественной обработки приствольных полос в плодовых насаждениях на террасированных склонах за один проход агрегата вдоль рядов.

Цель исследования – обоснование параметров и режимов работы двухроторной садовой фрезы, обеспечивающие полную обработку приствольной полосы плодовых насаждений за один проход при движении вдоль линии ряда в условиях террасного садоводства.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи исследований**:

1. Разработать конструктивно-технологическую схему вертикальной двухроторной садовой фрезы обеспечивающую качественную обработку приствольной полосы плодовых насаждений за один проход при движении вдоль линии ряда в условиях террасного садоводства.

2. Получить аналитические зависимости для обоснования рациональных конструктивных параметров и пределы их изменения при полном обходе двухроторной садовой фрезой вокруг штамба дерева.

3. Обосновать метод расчета динамической устойчивости ротора садовой фрезы.

4. Экспериментальным путем определить оптимальные параметры и режимы работы двухроторной садовой фрезы по критерию полноты фрезерования площади вокруг штамба плодового дерева.

5. Сопоставить результаты теоретических и экспериментальных исследований.

6. Определить экономическую эффективность применения двухроторной садовой фрезы.

Объект исследования – технологический процесс обработки приствольных полос плодовых насаждений на террасированных склонах и технические средства для его осуществления.

Предмет исследования – закономерности, связывающие параметры и режимы работы двухроторной садовой фрезы с полнотой фрезерования площади вокруг штамба плодового дерева за один проход при движении вдоль линии ряда в условиях террасного садоводства.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились с использованием законов математического анализа и теоретической механики. При проведении экспериментальных исследований применялись методы планирования многофакторного эксперимента. Обработка полученных данных осуществлена с использованием методов математической статистики и прикладных программ (Microsoft Excel, MathCad).

Научную новизну работы составляют:

- аналитические зависимости, позволяющие определить основные конструктивные и режимные параметры двухроторной садовой фрезы: диаметры роторов и предохранительных колес, угла установки поворотной балки фрезы; траекторию движения, кинематический режим работы, окружную скорость и частоту вращения фрезы, жесткость пружины, скорость движения, затраты мощности на привод фрезерного рабочего органа, а также пределы изменения этих параметров, оказывающие наибольшее влияние на качество работы;
- метод расчета динамической устойчивости ротора садовой фрезы;
- уравнение регрессии, описывающее зависимость полноты фрезерования приствольной полосы от параметров и режима работы двухроторной вертикальной садовой фрезы.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость представляют: аналитические зависимости, описывающие процесс работы двухроторной вертикальной садовой фрезы, позволяющие обосновать её основные конструктивные параметры и режимы работы; метод расчета динамической устойчивости ротора, позволяющий рассчитать критические скорости вращения ротора; уравнение регрессии, описывающее процесс фрезерования приствольной полосы, позволяющее определить оптимальные параметры и режим работы двухроторной садовой фрезы;

Практическую значимость представляют: конструктивно-технологическая схема вертикальной двухроторной садовой фрезы, позволяющая разработать техническое решение садовой фрезы, обеспечивающей полную обработку приствольной полосы за один проход при движении вдоль линии ряда в условиях

террасного садоводства; соотношение между параметрами и режимами работы двухроторной садовой фрезы с полнотой фрезерования площади вокруг штамба плодового дерева.

Техническая новизна предлагаемых конструктивных решений защищена 4 патентами на полезные модели (№206892, №214799, №184892, №222230).

Реализация результатов исследований. Опытный образец двухроторной садовой фрезы прошел производственные испытания в ООО «Племенной совхоз «Кенже» (г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика). Результаты исследований приняты к использованию в ФГБНУ «Северо-Кавказский НИИ горного и предгорного садоводства». Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ.

Степень достоверности и апробация работы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: результаты получены с использованием известных и хорошо зарекомендовавших методик исследования, современной измерительной и вычислительной техники; идея базируется на обобщении передового опыта ученых Северо-Кавказского НИИ горного и предгорного садоводства и Кабардино-Балкарского ГАУ; использованы результаты опубликованных исследований по теме диссертации Ф. М. Канарева, С. И. Камбулова, И. Б. Борисенко, Г. Г. Пархоменко; установлено качественное и количественное совпадение результатов теоретических исследований и экспериментальных данных с результатами, представленными в независимых источниках; использованы современные методы статистической обработки экспериментальных данных с использованием программ MathCad и Microsoft Excel.

Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на: Международной научной конференции «Национальные приоритеты и безопасность» (г. Нальчик, 2020 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты» (г. Нальчик, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Энергетическая, экологическая и продовольственная безопасность: акту-

альные вопросы, достижения и инновации» (г. Нальчик, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Разработка и применение наукоёмких технологий в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства» (г. Нальчик, 2022 г.); III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты» (г. Нальчик, 2023 г.); Международной научно-практической конференции «Развитие современной аграрной науки: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Нальчик, 2024 г.).

Разработанная двухроторная садовая фреза отмечена дипломом и золотой медалью на XXIV Всероссийской агропромышленной выставке «Золотая осень 2022» (г. Москва, 2022 г.).

На защиту выносятся:

- конструктивно-технологическая схема и опытный образец двухроторной садовой фрезы для полной обработки приствольной полосы плодовых насаждений в условиях террасного садоводства;
- аналитические зависимости, описывающие процесс работы двухроторной вертикальной садовой фрезы;
 - метод расчета динамической устойчивости ротора садовой фрезы;
- результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров и режимов работы двухроторной садовой фрезы;
- оценка сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований

Публикации. По теме исследований опубликовано 19 печатных работ, в т.ч. 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 монография, 4 патента на полезные модели. Общий объем опубликованных работ составляет 9,3 п. л., из них личный вклад автора 6,2 п. л.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, рекомендаций, списка литературы и приложений. Общий объем

работы составляет 156 страниц машинописного текста, в т.ч. 7 таблиц, 62 рисунка, 16 приложений. Список литературы содержит 147 наименований.

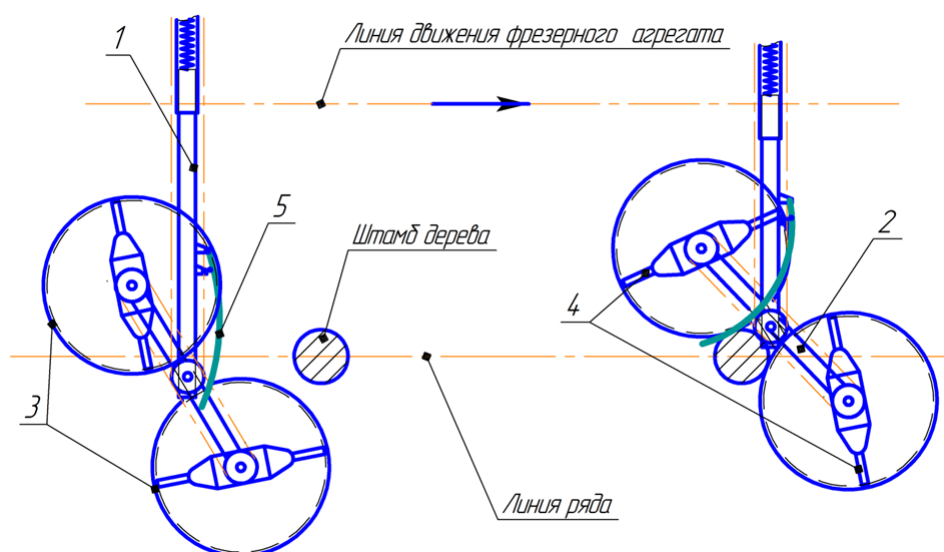
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводятся актуальность проводимых исследований, цель работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ состояния и перспективы развития садоводства на террасированных землях на примере Кабардино-Балкарской Республики, проведен анализ механизмов и машин, применяемых для обработки почвы приствольной полосы, приведены результаты научных исследований процесса фрезерования приствольных полос в промышленных садах.

Ведение садоводства в условиях террасы существенно усложняет применение традиционных средств механизации, при этом повышаются требования к надежности машин и агрегатов, работающих в условиях динамических и ударных нагрузок. На основании анализа существующей проблемы и в соответствии с поставленной целью были определены задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований по обоснованию основных параметров и режимов работы двухроторной фрезы. Предлагается схема двухроторной вертикальной приствольной фрезы, конструктивная особенность которой позволяет произвести полный обход штамба дерева за один проход по линии ряда (патент РФ № 214799) (рисунок 1).



а)

б)

а) при входе в контакт со штамбом, б) при выходе из контакта со штамбом
 Рисунок 1. - Конструктивно-технологическая схема двухроторной фрезы

К подвеске трактора крепится телескопическая упругая несущая балка 1, на конце которой установлен поворотный брус 2 с предохранительными колесами 3, а также два фрезерных ротора 4. При движении данного агрегата по ряду, поворотный брус 2 с роторами 4 удерживается от свободного вращения механизмом управления. При подходе к дереву, щуп 5 касается штамба и отклоняется посредством системы рычагов, освобождая поворотный брус 2 с фрезерными рабочими органами 4. Под действием реактивных сил, возникающих от взаимодействия ножей ротора фрезы с почвой, брус поворачивается на 180^0 , обходя штамп дерева с полной механической обработкой площади вокруг штамба. При обходе штамба дерева пружины сжатия, находящиеся в телескопической несущей балке 1, обеспечивают постоянный контакт предохранительных колес и штамба. После освобождения щупа 5 от связи со штамбом, механизм управления поворотом возвращается в исходное положение, фиксируя поворотный брус 2. Фреза может агрегатироваться с тракторами класса 0,6 - 1,4. Конструктивно-технологическая схема работы предлагаемой фрезы приводится на рисунке 2. Расчетный диаметр роторов определяется из необходимости обеспечения полной механической обработки приствольной зоны с учетом их перекрытия роторами для исключения огрехов.

Проведенное моделирование обхода штамба с применением программы Solid Works, показало адекватность предложенной математической модели и высокую эффективность конструктивного исполнения при полном фрезеровании приствольного круга за один проход агрегата (рисунок 3).

Двухроторная фреза принимается как кривошипный коленно-рычажный плоский механизм, с осью относительного вращения кривошипа, находящейся на расстоянии $e = const$ (рисунок.4). В результате проведенных теоретических исследований кинематических и технологических параметров, получено выражение зависимости угла φ_1 поворота бруса OB от функции, определяющее перемещение фрезерного агрегата x_A :

$$\varphi_1 = \arctan \frac{x_A}{e} + \arccos \frac{l^2 - r^2 - e^2 + x_A^2}{2r_1}. \quad (1)$$

Получены основные допустимые значения основных кинематических и геометрических параметров фрезы.

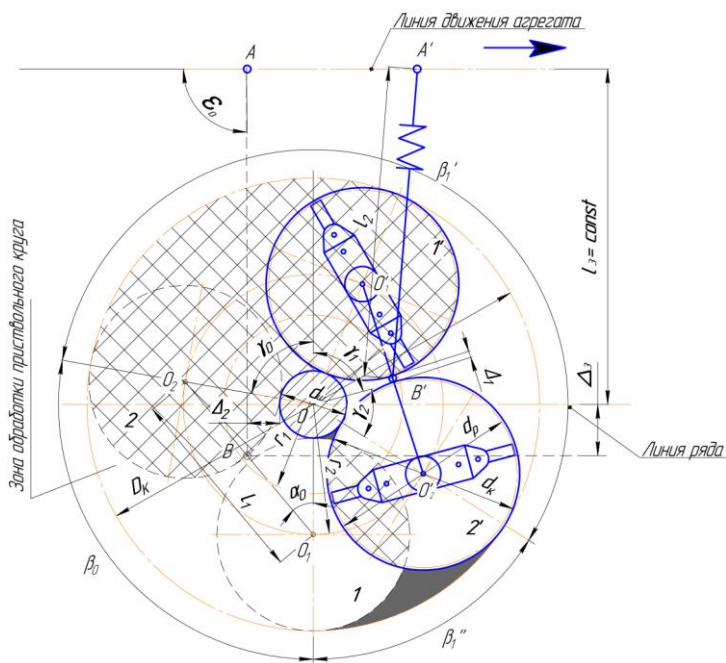


Рисунок 2. – Конструктивно-технологическая схема фрезы при обходе штамба дерева

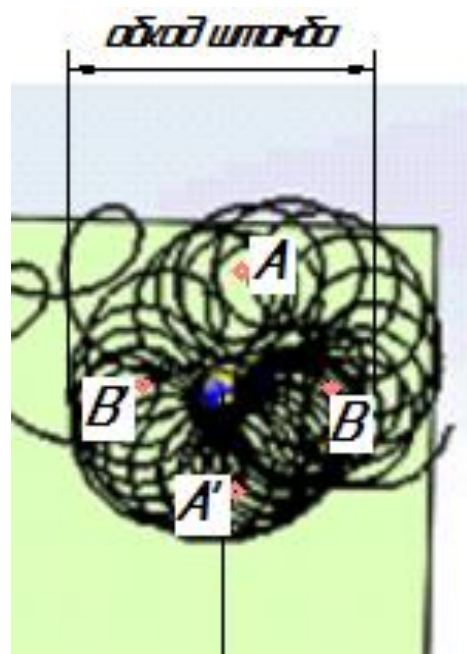


Рисунок 3. – Траектория движения ножей фрезы при обходе штамба дерева

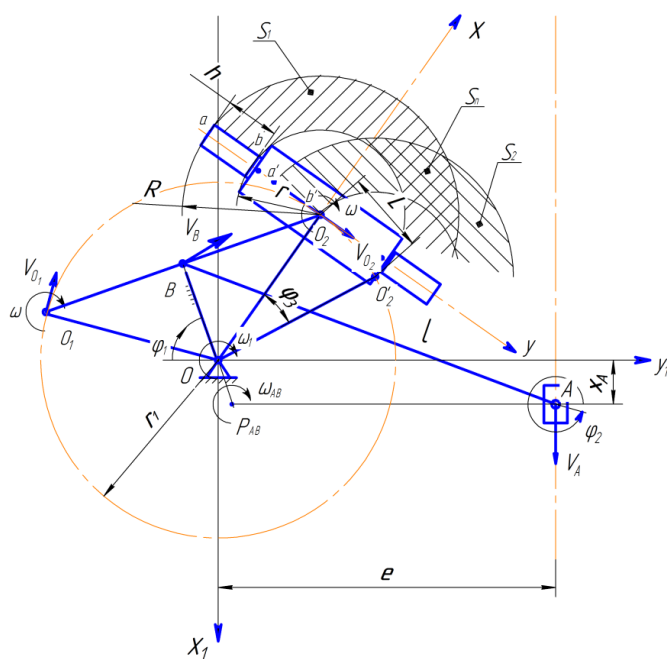


Рисунок 4. – Схема кинематики ножей фрезы при обходе вокруг штамба дерева

Проведено обоснование режима вращения роторов фрезы с использованием методов расчета ротационных почвообрабатывающих машин, изложенных в работе Ф. М. Канарёва. На рисунках 5 и 6 приведены траектории движения соседних ножей ротора, исключаящие образования

пропусков в их работе и изменения угла атаки крыла ножа, для обеспечения минимального сопротивления при резании почвы.

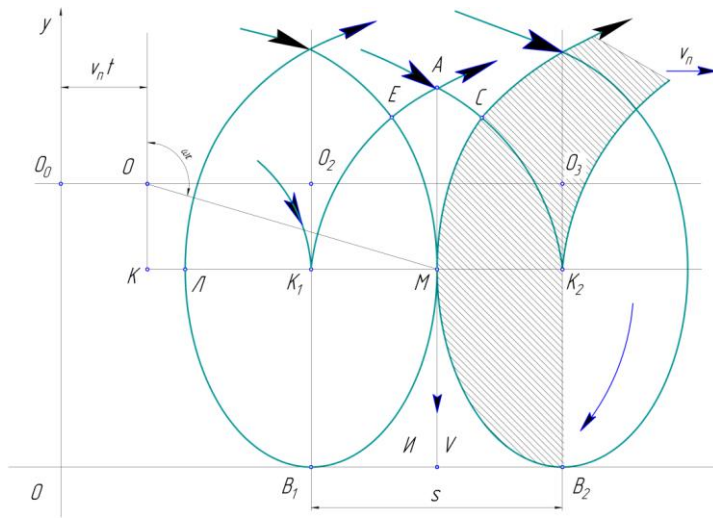


Рисунок 5. – Схема к определению режима вращения ротора фрезы

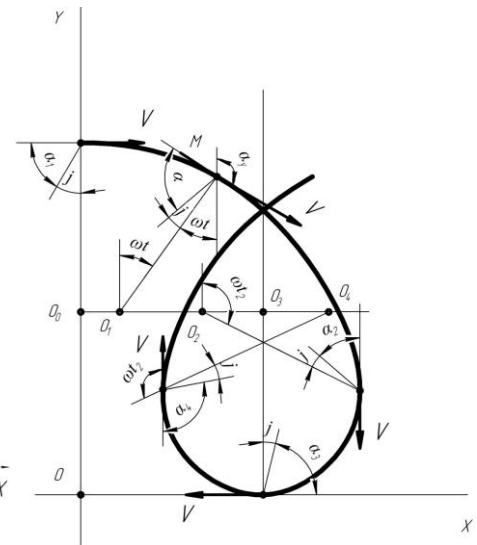


Рисунок 6. – Схема изменения угла атаки крыла ножа

Определены минимальные потребные мощности роторов предлагаемой фрезы применительно для почв с удельным сопротивлением до 100 кН/м^2 . При скорости перемещения агрегата равном 1 м/с , минимальная расчетная потребная мощность фрезы составляет $5,3 \text{ кВт}$. Также определены суммарные жесткости всех упругих механизмов фрезы.

Проведены теоретические исследования сил и моментов, возникающих при взаимодействии поворотной фрезерной секции со штамбом при его обходе (рисунок 7).

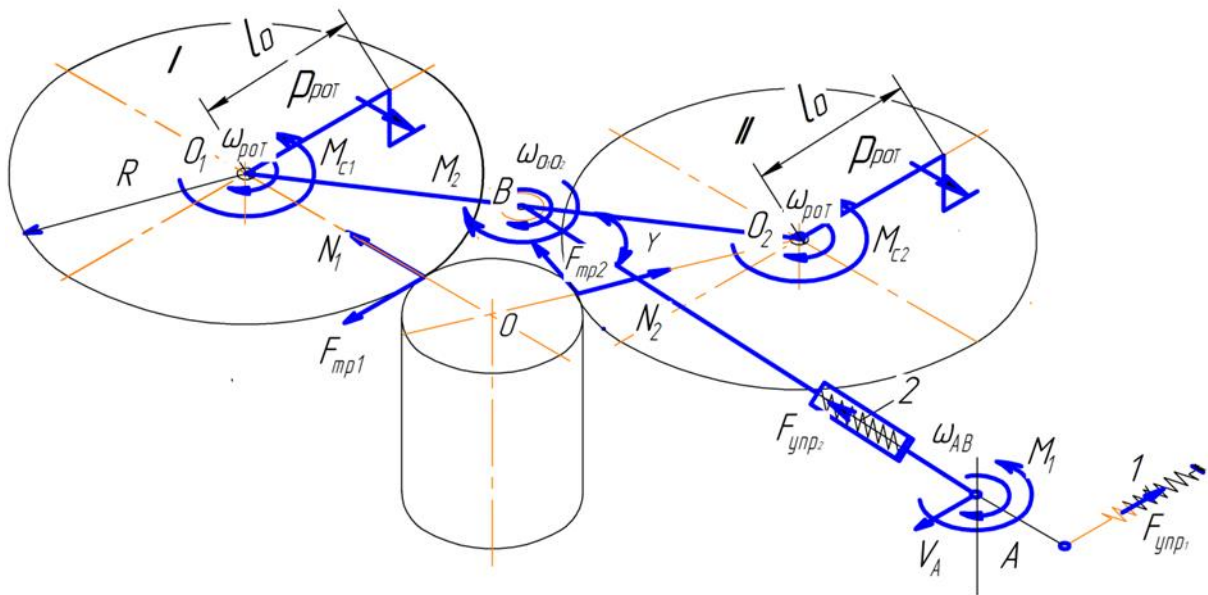


Рисунок 7. – Расчетная силовая схема двухроторной фрезы при взаимодействии со штаблом
Перекачивание предохранительных колес по коре штабла без скольжения возможно при появлении сил трения F_{mp} :

$$|F_{mp_i}| \leq N_i f_{mp}, \quad (2)$$

где N_i - сила давления колес на штабл, Н; f_{mp} - коэффициент трения.

Необходимо обеспечить условие, при котором каждое из колес 1 и 2 прижимается к штаблу с силой $N_i > 0$.

Получены выражения для расчета сил давления на штабл дерева для каждого колеса в процессе их обхода:

$$N_1 = \frac{\frac{c_1 \cdot \Delta l_3 \cdot l_2 \sin \gamma_1}{l_1} \sin \vartheta \cdot e - M_2 - c_2 \cdot \Delta l_2 \sin(90 - \vartheta) \cdot e}{h}; \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{\frac{c_1 \cdot \Delta l_3 \cdot l_2 \sin \gamma_1}{l_1} \sin \vartheta \cdot e + M_2 - c_2 \cdot \Delta l_2 \sin(90 - \vartheta) \cdot e}{h}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) показывают, что силы давления колес на штабл дерева зависят от коэффициентов жесткости пружин, геометрических параметров фрезы, а также постоянного вращающего момента от сил сопротивления почвы. В соответствии агротехническими требованиями многократно допускаемое контактное давление на кору дерева составляет 0,5 - 0,9 МПа.

Получен график, показывающий зависимости силы давления предохранительных колес на штаб от угла поворота фрезерной секции и коэффициента жесткости возвратной пружины балки, работающей на растяжение (рисунок 8).

При обходе штаба, увеличивается сила растяжения пружины телескопической балки и при положительном угле поворота секции, значения силы давления на штаб резко возрастает. Заштрихованная зона показывает предельно допустимые значения контактных давлений на штаб дерева. Для предлагаемой фрезы расчетное контактное давление не превышает 0,6 МПа.

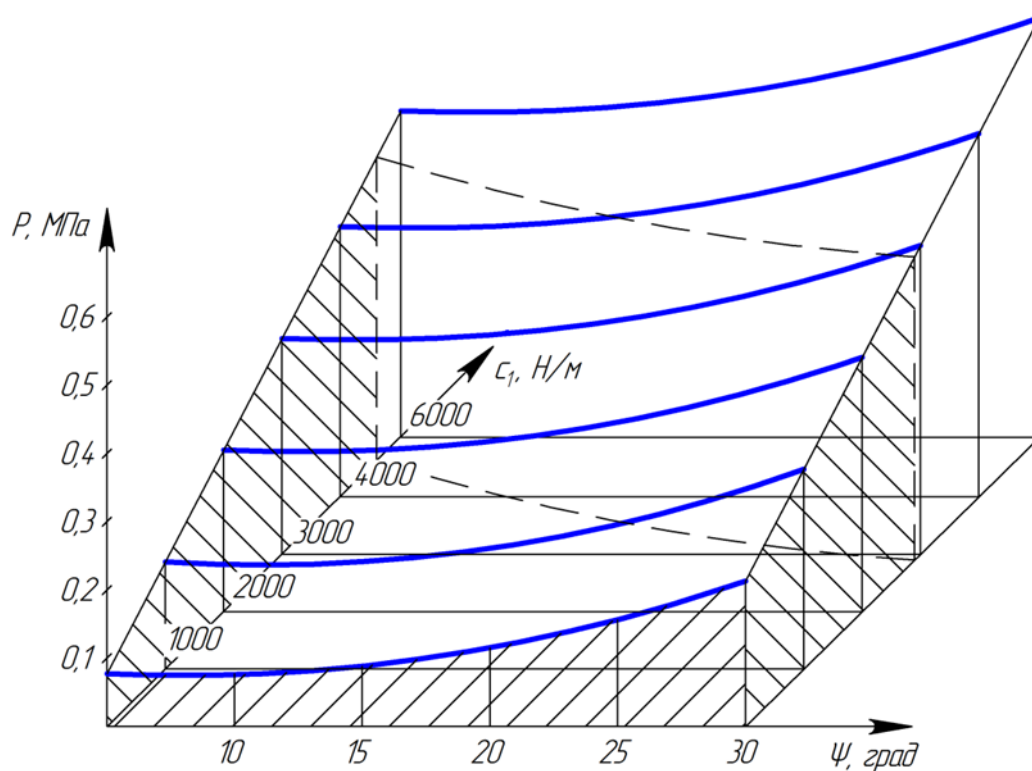


Рисунок 8. – График зависимости силы давления на штаб дерева, от угла поворота телескопической балки и коэффициента жесткости возвратной пружины c_1

Исследования кинематических параметров фрезы с 4-мя степенями свободы с применением уравнений Лагранжа 2-го рода позволили получить математическую модель в виде 4 уравнений движения (5 - 8) допускающие изменение параметров массы деталей и геометрии звеньев конструкции (рисунок 9).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_A} \right) - \frac{\partial T}{\partial X_A} = (m_1 + m_2 + m_3) \cdot \ddot{X}_A + (m_2 + m_3) \cdot BA \cdot (\ddot{\varphi}_1 \cdot \cos \varphi_1 - \dot{\varphi}_1^2 \cdot \sin \varphi_1) + m_3 \cdot K_1 = Q; \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = \left(\frac{m_1}{12} + m_2 + m_3 \right) \cdot \ddot{\varphi}_1 \cdot BA^2 + (m_2 + m_3) \cdot BA \cdot (\ddot{X}_A \cdot \cos \varphi_1 - \dot{X}_A \cdot \dot{\varphi}_1 \cdot \sin \varphi_1) + m_3 \cdot K_2 = Q_1; \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = (m_2 + m_3) \cdot \ddot{\varphi}_2 \cdot BC^2 + m_3 \cdot K_3 = Q_2; \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_3} = \frac{m_3 \cdot CD^2 \cdot \ddot{\varphi}_3}{3} = Q_3. \quad (8)$$

где Q, Q_{1-3} – обобщенные силы системы, Н; K_{1-3} – коэффициенты, учитывающие соотношение геометрических и кинематических параметров деталей фрезы; m_1, m_2, m_3 – массы телескопической балки, поворотного бруса и ротора соответственно, кг; BA – длина телескопической балки, м; BC – радиус расположения оси ротора относительно оси поворотного бруса, м; CD – радиус ротора, м.

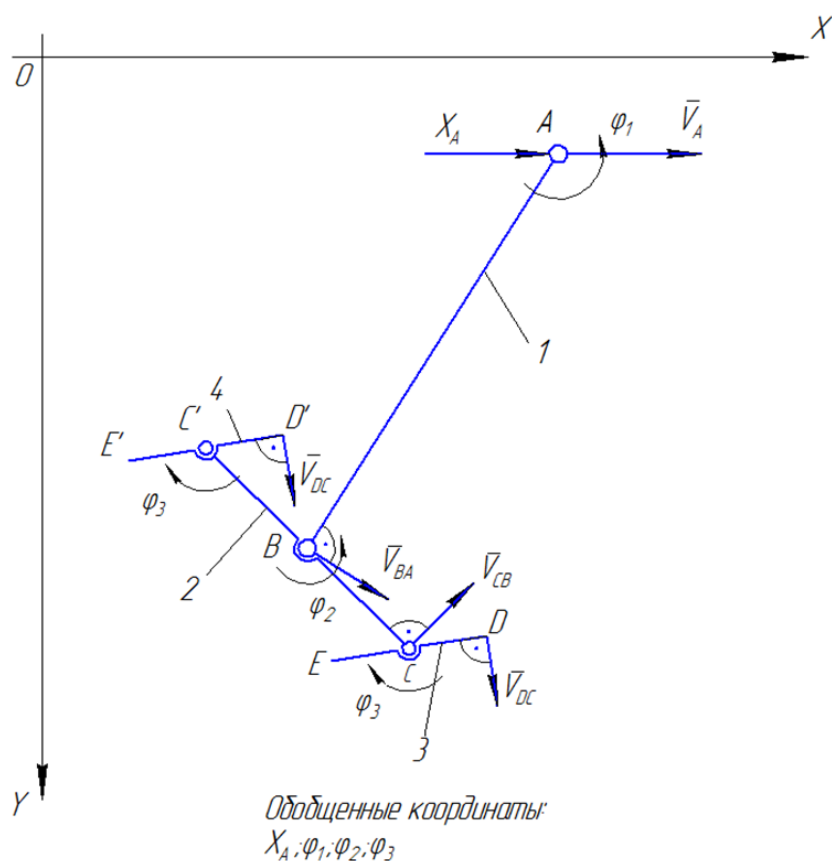


Рисунок 9. – Структурная схема двухроторной фрезы

Для повышения работоспособности фрезерного агрегата необходимо обеспечить динамическую устойчивость вращающихся узлов и деталей. Динамические нагрузки от вращающихся деталей существенно уменьшают долговечность опор валов и самих рабочих деталей.

Существующие методы расчета не дают точных результатов в определении параметров, вынужденных колебаний вследствие допускаемых упрощений (рассматривается вал постоянной жесткости, не учитывается распределенная по длине масса вала и др.).

Предлагается метод расчета вынужденных колебаний сложного ротора с помощью синтеза методов кинетостатики и начальных параметров, который позволяет учесть все особенности сложного ротора. В методе учитывается: распределенная масса вала, переменная жесткость, упругое защемление в опорах, масса насаженных деталей, их гироскопичность, эксцентricность посадки деталей, сосредоточенные внешние нагрузки (рисунок 10).

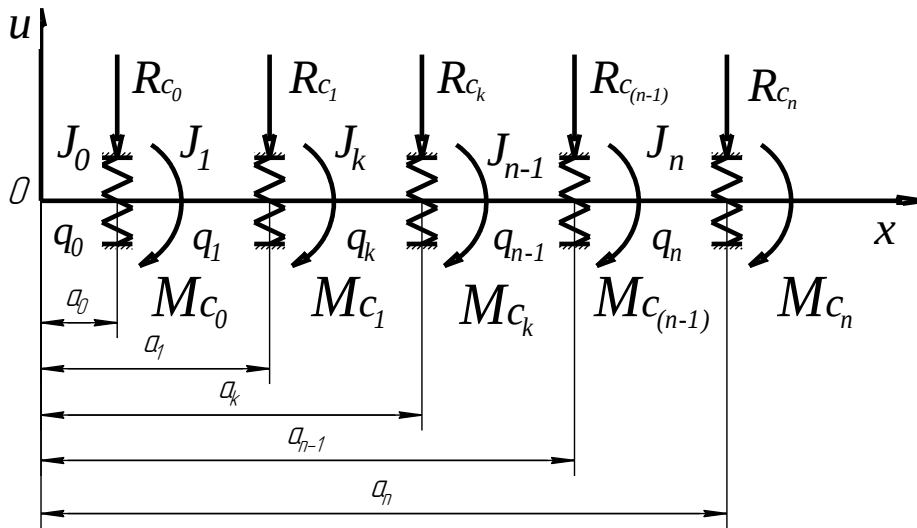


Рисунок 10. - Расчетная схема к определению динамической устойчивости ротора фрезы

Дифференциальное уравнение упругой линии i -го участка вращающегося ротора, в предположении, что масса ротора на данном участке

по длине распределена равномерно имеет вид:

$$\frac{d^4 u_i(x)}{dx^4} - k_i^4 u_i(x) = 0, \quad (9)$$

где $a_i \leq x \leq a_{i+1}, \quad k_i^4 = \frac{\gamma F_i \omega^2}{g E J_i}$

γ - удельный вес материала ротора, Н/м³; F_i - площадь поперечного сечения участка ротора, м²; ω - угловая скорость вращения ротора, рад/с; g - ускорение свободного падения, м/с²; E - модуль упругости материала ротора, Па; J_i - момент инерции поперечного сечения участка ротора, м⁴.

Общее решение уравнения (9) записывается в виде:

$$u_i(x) = A_i S[k_i(x - a_i)] + B_i T[k_i(x - a_i)] + C_i U[k_i(x - a_i)] + D_i V[k_i(x - a_i)], \quad (10)$$

где A, B_i, C_i и D_i - произвольные постоянные; S, T, U и V - функции А. Н. Крылова $S(y) = 0,5(ch y + \cos y); \quad T(y) = 0,5(sh y + \sin y); \quad U(y) = 0,5(ch y - \cos y); \quad V(y) = 0,5(sh y - \sin y).$

Функции S, T, U и V обладают следующими свойствами:

$$S(0) = 1, \quad T(0) = U(0) = V(0) = 0, \quad (a)$$

$$S'(y_i) = V(y_i); \quad T'(y_i) = S(y_i); \quad U'(y_i) = T(y_i) \quad \text{и} \quad V'(y_i) = U(y_i). \quad (б)$$

Дифференцируя уравнение (10) по x с учетом свойств (б) получим производные через первообразные функции А. Н. Крылова. Проведенные численные исследования показали, что при массе вала, составляющей около 20% массы диска расхождение между первыми критическими скоростями, по сравниваемым методам не превосходит 10%. В нашем случае первое критическое значение угловой скорости ротора с учетом вышеперечисленных факторов составляет 608 рад/с, что вполне находится в безопасной зоне.

В результате проведенных теоретических исследований получены основные технологические параметры разработанной двухроторной фрезы: поступательная скорость агрегата от 0,55 до 1,66 м/с при частоте вращения ротора фрезы от 150 до 350 мин^{-1} и допустимого значения коэффициента жесткости пружины сжатия телескопической балки - $c_2 \leq 1730 \text{ Н/м}$.

В **третьей главе** приведены программа и методика экспериментальных исследований, результаты натурных и производственных экспериментальных исследований.

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен опытный образец двухроторной вертикальной фрезы в соответствии с ранее выбранной конструктивной схемой. Два фрезерных ротора с L-образными ножами смонтированы на поворотном бруске, закрепленном на телескопической упругой раме. Суммарная ширина обработки в нашем случае составляло 0,8 м и имеет возможность регулировки по ширине до 1 м. Привод роторов осуществлялся от асинхронного электродвигателя мощностью 7,5 кВт с частотой вращения 725 мин^{-1} . Для изменения частоты вращения роторов были подобраны шкивы различных диаметров. Конструкция фланцев роторов позволяла размещать от 2-х до 4-х L-образных ножей.

Критерием оценки эффективности работы двухроторной фрезы принята полнота обработки приствольного круга плодового дерева (рисунок 11).

Теоретические исследования показали, что на полноту обработки приствольного круга (в % от площади приствольного круга) будут влиять следующие факторы: скорость передвижения агрегата $V(\text{м/с})$; глубина обработки почвы $h(\text{м})$.



Рисунок 11. - Контроль качества обработки почвы приствольной полосы

Для проведения многофакторных экспериментов составлена матрица трехуровневого плана Бокса-Бенкина. Значения интервалов варьирования независимых переменных факторов, установленные на основании анализа состояния проблемы, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы и уровни их варьирования

Шаг и уровни варьирования факторов	Кодированное (безразмерное) значение факторов	Натуральное значение факторов		
		X_1 (V , м/с)	X_2 (h , м)	X_3 (ω , рад/с)
Шаг	-	0,514	0,02	5,2
Верхний	+1	1,54	0,1	36,5
Нулевой	0	1,03	0,08	31,3
Нижний	-1	0,514	0,06	26,1

Уравнение регрессии показывающий полноту обработки (в %) при нулевом уровне глубины фрезерования почвы ($h = 0,08$ м) имеет вид:

$$K_{II} = -264,5741 + 18,6806 V + 20,039 \omega - 0,059 V\omega - 2,4654 V^2 - 0,3\omega^2. \quad (11)$$

Поверхность отклика при изменении скорости передвижения фрезы и угловой скорости вращения ротора представлена на рисунке 12.

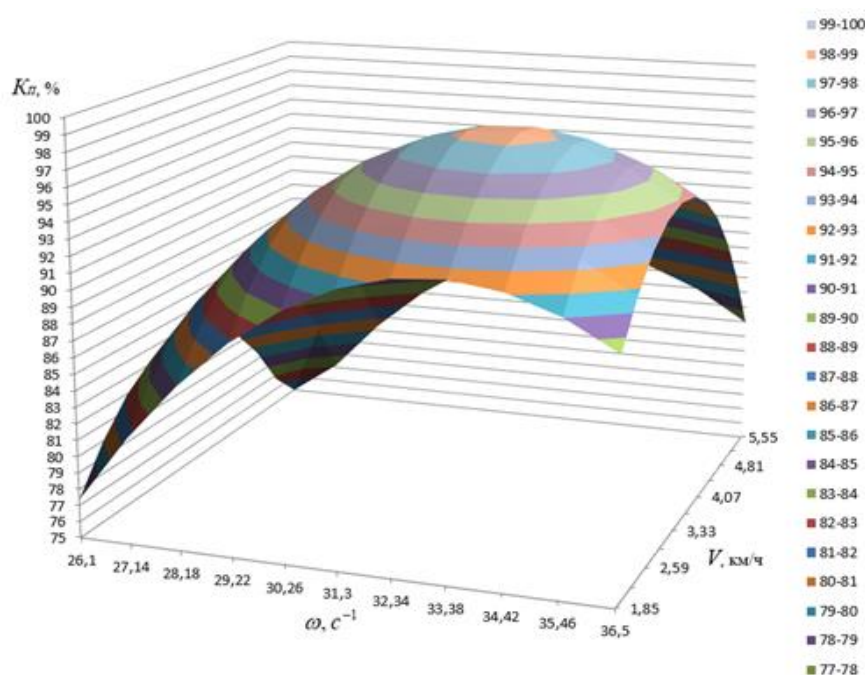


Рисунок 12. – Поверхность отклика зависимости полноты фрезерования приствольного круга плодового дерева K_n от скорости передвижения фрезы V и угловой скорости вращения ротора ω при глубине обработки почвы $h = 0,08$ м

Анализ результатов многофакторного эксперимента показывает, что максимальное значение критерия оптимизации (полнота фрезерования приствольного круга плодового дерева) 98,4% достигается при следующих значениях основных параметров двухроторной фрезы: скорость передвижения агрегата $V = 0,941$ м/с; глубина обработки почвы $h = 0,08$ м; угловая скорость вращения ротора $\omega = 33,06$ рад/с.

При скорости передвижения фрезерного агрегата $V = 0,941$ м/с и угловой скорости вращения роторов $\omega = 33,06$ рад/с, расхождения с теоретически полученными значениями данных показателей не превышает 7%. При этом обеспечивается полнота обработки более 95%, что показывает адекватность расчетной и конструктивно-кинематической схемы фрезы.

Производственные испытания опытного образца двухроторной фрезы проводили в 2022-2024 гг. в садах, размещенных на склоновых землях ООО Племенной совхоз «Кенже» а также на экспериментальных участках Северо-Кавказского НИИ горного и предгорного садоводства (г.о. Нальчик, КБР) (рисунки 13 и 14).

Испытания проводились в слаборослом саду (на полукарликовом подвое). Машина агрегатировалась с трактором МТЗ-80. Почва в ряду деревьев обрабатывалась на глубину 0,08 м. На момент обработки засоренность почвы в зоне приствольного круга достигала 460 шт./м.



Рисунок 13. – Общий вид двухроторного фрезерного агрегата



Рисунок 14. - Производственные испытания двухроторной фрезы

В результате проведения производственных испытаний двухроторной фрезы установлена его фактическая работоспособность, а также подтверждены основные эксплуатационные показатели: производительность за час чистого рабочего времени – 0,27 га/ч и производительность за час сменного времени – 0,18 га/ч, угловая скорость вращения ротора $\omega = 33,06 \text{ с}^{-1}$. Обработка приствольной зоны плодовых деревьев происходит с высоким качеством за один проход агрегата по линии ряда.

В четвертой главе приведены расчеты экономической эффективности при реализации предложенной технологии и конструктивного решения.

Проведенные расчеты показали, что с использованием предлагаемой двухроторной садовой фрезы производительность агрегата повысилась в 1,8 раза, эксплуатационные затраты снизились в 2,9 раза, при этом годовой экономический эффект составил 7,4 тыс. руб./га. Срок окупаемости 0,54 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. На основании проведенного анализа технических средств для механической обработки приствольных полос плодовых насаждений, разработана конструктивно-технологическая схема двухроторной садовой фрезы, обеспечивающая качественную обработку приствольной полосы плодовых насаждений за один проход при движении вдоль линии ряда в условиях террасного садоводства. Новизна технических решений подтверждена 4 патентами РФ на полезные модели (№206892, №214799, №184892, №222230).

2. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить основные конструктивные параметры и режимы работы двухроторной садовой фрезы, обеспечивающие полноту фрезерования площади приштамбовой зоны плодовых насаждений: диаметры роторов и предохранительных колес, угол установки поворотной балки фрезы, траекторию движения, кинематический режим работы, частоту вращения роторов (от 150 до 350 мин⁻¹), жесткость пружины ($c_2 \leq 1730$ Н/м), скорость движения (от 0,55 до 1.66 м/с), затраты мощности на привод фрезерного рабочего органа, а также пределы изменения этих параметров.

3. Разработан метод расчета динамической устойчивости сложного ротора, учитывающий распределение массы вала, переменную жесткость, упругое зажатие в опорах, массу установленных дисков, их гироскопические свойства, эксцентricность посадки дисков и сосредоточенные внешние нагрузки. Первое критическое значение угловой скорости роторов фрезы составляет 608 рад/с.

4. В результате проведенных экспериментальных исследований были определены оптимальные параметры скорости передвижения двухроторной фрезы – 0,941 м/с, глубины обработки – 0,08 м, угловой скорости вращения ротора фрезы – 33,06 рад/с, обеспечивающих полноту фрезерования площади вокруг штамба плодового дерева - 98,4%. Производственное испытание опытного образца двухроторной садовой фрезы показало высокую полноту фрезерования площади приштамбовой зоны и приствольной полосы плодовых насаждений за

один проход вдоль линии ряда, удовлетворяющее основным требованиям по обработке.

5. Расхождение между оптимальными экспериментальными значениями скорости передвижения фрезерного агрегата $V = 0,941$ м/с и угловой скоростью вращения роторов $\omega = 33,06$ рад/с, обеспечивающими полноту фрезерования приштамбовой зоны более 95%, и теоретическими значениями V и ω не превышает 7%.

6. Использование предлагаемой двухроторной садовой фрезы в технологическом процессе по уходу за приствольными полосами плодовых насаждений в террасном садоводстве позволило повысить производительность в 1,8 раза, снизить эксплуатационные затраты в 2,9 раза, при этом получить годовой экономический эффект в размере 7,4 тыс. руб./га. Срок окупаемости 0,54 года.

Рекомендации производству

Предложенные в работе конструкция двухроторной садовой фрезы и метод динамической устойчивости ротора могут быть использованы конструкторскими организациями при разработке фрез для приствольной обработки полос плодовых насаждений в промышленных садах суперинтенсивного типа.

Перспективы дальнейшей разработки предлагаемой темы

Совершенствование механизма обхода штамба позволит выполнить разработку фрез для приствольной обработки полос плодовых насаждений в луговых и колоновидных садах, имеющих очень высокую плотность посадки саженцев - по типу питомника (70–90 x 20–30 см).

Основные положения диссертации опубликованы:

– в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Обоснование параметров рабочего органа фрезы для террасного садоводства / А. К. Апажев, А. М. Егожев, Е. А. Полищук, **А. А. Егожев** // Сельский механизатор. – 2021. – № 8. – С. 8-11.

2. Двухроторная фреза для террасного садоводства / А. К. Апажев, **А. А. Егожев**, А. М. Егожев, Е. А. Полищук // Сельский механизатор. – 2022. – № 4. – С. 10-11.

3. Апажев, А. К. Обоснование конструктивно-технологических параметров рабочего органа фрезы для обработки почвы вокруг штамба дерева в условиях террасы / А. К. Апажев, А. М. Егожев, **А. А. Егожев** // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2022. – № 2(36). – С. 68-76.

4. Вертикальная фреза для обработки приствольных полос интенсивного сада / А. К. Апажев, **А. А. Егожев**, А. М. Егожев [и др.] // Сельский механизатор. – 2023. – № 5. – С. 20-21.

5. Исследование процесса взаимодействия предохранительных колес двухроторных вертикальных фрез со штамбом дерева / А. К. Апажев, А. М. Егожев, Е. А. Полищук, **А. А. Егожев**, Н. А. Алиев // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2023. – № 3(41). – С. 92-101.

6. Машина для обработки приствольных полос интенсивного сада на склоновых землях / А. К. Апажев, А. М. Егожев, Е. А. Полищук, **А. А. Егожев**, Н. А. Алиев // Сельский механизатор. – 2024. – № 6. – С. 8-9.

7. Комбинированная приствольная фреза для интенсивного сада / А. М. Егожев, А. К. Апажев, А. Б. Барагунов, **А. А. Егожев**, Х. А. Апхудов // Сельский механизатор. – 2025. – № 9. – С. 7-8.

– в монографии:

8. Высокопродуктивные и экологически чистые технологии и технические средства по уходу за плодовыми насаждениями в горном садоводстве Кабардино-Балкарской Республики / А. К. Апажев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов, **А. А. Егожев** [и др.]. – Нальчик: КБГАУ, 2022. – 187 с.

– в патентах на полезные модели:

9. Патент №206892 Российская Федерация, СПК А01В 39/16 (2021.05). Фреза для обработки приствольных полос интенсивного сада: №2021109828: заявл. 08.04.2021, опубл. 30.09.2021 / Егожев А. М., Апажев А. К., Полищук Е. А., **Егожев А. А.**; заявитель ФГОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова». – 5 с.: ил.

10. Патент №184892 Российская Федерация, МПК А01В 39/16 (2006.01). Фреза для приствольной полосы: №2018122520: заявл. 19.06.2018, опубл.

13.11.2018 / Егожев А. М., Полищук Е. А., **Егожев А. А.**; заявитель ФГОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова». – 5 с.: ил.

11. Патент №214799 Российская Федерация, СПК А01В 39/163 (2022.06). Фреза для террасного сада: №2022115620; заявл. 08.06.2022; опубл. 15.11.2022/ Егожев А. М., Апажев А. К., Мисиров М. Х. Полищук Е. А., **Егожев А. А.**; заявитель ФГОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова». – 5 с.: ил.

12. Патент №222230 Российская Федерация, СПК А01В 39/163 (2022.06). Комбинированная садовая фреза: №2023120291; заявл. 01.08.2023; опубл. 15.12.2023/ Егожев А. М., Апажев А. К., Мисиров М. Х. Полищук Е. А., **Егожев А. А.**, Алиев Н. А.; заявитель ФГОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова». – 5 с.: ил.

– в прочих изданиях:

13. Обоснование параметров поворотной секции садовой фрезы в условиях террасы / А. К. Апажев, А. М. Егожев, Е. А. Полищук, **А. А. Егожев** // Энергосбережение и энергоэффективность: проблемы и решения: материалы научно-практической конференции. – Нальчик, Кабардино-Балкарский ГАУ, 2020. – С. 45-50.

14. Кинематический анализ рабочего органа фрезы для террасного садоводства / А. К. Апажев, А. М. Егожев, Е. А. Полищук, **А. А. Егожев** // Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Нальчик, Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021. – С. 146-149.

15. Параметры и режимы работы фрезы для террасного садоводства / А. К. Апажев, А. М. Егожев, **А. А. Егожев** // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты: материалы II всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Нальчик, Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. – С. 11-14.

16. **Егожев, А. А.** К расчету динамической устойчивости вращающихся рабочих органов садовых фрез / А. А. Егожев // Разработка и применение наукоемких технологий в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства: материалы Международной научно-практической конференции. – Нальчик, Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. – С. 146-151.

17. Апажев, А. К. Машина для механической обработки приствольных полос в условиях террасного садоводства / А. К. Апажев, **А. А. Егожев** // Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность: материалы

VIII международной научно-практической конференции. – Нальчик, Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. – С. 298-303.

18. Обоснование динамики роторных систем садовых фрез / А. К. Апажев, А. М. Егожев, **А. А. Егожев**, Н.А. Алиев // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты: материалы III всероссийской (национальной) научно-практической конференции. - Нальчик, Кабардино-Балкарский ГАУ, 2023. – С. 17-20.

19. Исследование динамических параметров двухроторной садовой фрезы / А. М. Егожев, А. К. Апажев, **А. А. Егожев**, Н. А. Алиев // Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность: материалы IX международной научно-практической конференции. - Нальчик, Кабардино-Балкарский ГАУ, 2023. – С. 219-223.

Подписано в печать _____ 2025. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. лист – 1.

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии Кабардино-Балкарского ГАУ
360030, г. Нальчик, пр. Ленина, 1в