

На правах рукописи



Земляной Андрей Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕНТОЧНОГО
РЕЖУЩЕГО АППАРАТА МАШИНЫ ДЛЯ КОНТУРНОЙ
ОБРЕЗКИ ПЛОДОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ**

Специальность 05.20.01- Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск – наукоград РФ 2022

Работа выполнена на кафедре транспортно-технологических машин и основ конструирования в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Завражнов Андрей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Шекихачев Юрий Ахметханович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», декан факультета механизации и энергообеспечения предприятий, профессор
Бухтояров Леонид Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, доцент

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства» (ФГБНУ ФНЦ Садоводства) Министерства науки и высшего образования

Защита состоится 30 июня 2022 года в 14 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» по адресу: 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545)3-88-13, доб. 3-82, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте университета <http://www.mgau.ru>, а также на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: www.vak.minobrnauki.gov.ru. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направить ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Михеев Николай Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из основных технологических операций в садоводстве является обрезка плодовых деревьев.

По определению, обрезка – это агротехническая операция по удалению отдельных частей плодового растения для регуляции его роста и улучшения показателей урожайности.

При этом, являясь весьма важной технологической операцией в садоводстве, обрезка плодовых деревьев одновременно является наиболее трудоемкой операцией с преобладанием ручного труда. Так, доля трудозатрат на проведении обрезки составляет более 80% в молодых садах и достигает 30 % в плодоносящих садах, а объем ручного труда составляет более 90%.

В связи с этим, механизация процесса обрезки плодовых деревьев, как технологической операции, является весьма актуальной.

Под механизированной обрезкой следует понимать контурную обрезку (ограничение) периферийной части кроны (ветвей и побегов в верхней части и с боковых сторон плодового дерева), проведенную машинами с различными режущими аппаратами по заранее определенному контуру.

Специфической особенностью отечественного промышленного садоводства является наличие и одновременная эксплуатация различных категорий садов (экстенсивных, нормальных, интенсивных и высокоинтенсивных), предусматривающих особое отношение к техническому исполнению машин для проведения обрезки в общем, и к режущим аппаратам в частности.

Зарубежные машины для обрезки (контурные обрезчики) в основном предназначены для работы только в интенсивных и высокоинтенсивных садах.

В настоящее время в системе инженерного обеспечения практически отсутствуют машины для обрезки плодовых деревьев с учетом особенностей промышленного садоводства России.

Степень разработанности проблемы. При работе над диссертацией определено, что большинство научных трудов по теме исследования направлены на изучение процессов и машин для проведения обрезки в садах экстенсивного типа. Это отразилось на том, что при разработке и внедрении машин для контурной обрезки использовались технические решения, которые не учитывали технологические особенности развития современного отечественного промышленного садоводства, что значительно снижает эффективность механизации обрезки и качество ее выполнения.

Цель исследования: Повышение эффективности и качества проведения механизированной контурной обрезки плодовых деревьев за счет использования режущего аппарата ленточного типа.

Задачи исследования:

— провести аналитические исследования и разработать технико-технологические требования на проведение контурной обрезки плодовых деревьев с учетом специфических особенностей отечественного промышленного садоводства;

- сгенерировать концептуальную модель и разработать технический облик машины для контурной обрезки с ленточным режущим аппаратом;
- разработать математическую модель процесса взаимодействия ленточного режущего аппарата с ветвями плодовых деревьев в режиме бесподпорного резания и обосновать методы ее идентификации;
- разработать методику и средства проведения экспериментальных исследований;
- разработать действующий макет-демонстратор ленточного режущего аппарата;
- исследовать размерные и физико-механические характеристики ветвей плодовых деревьев, определить их влияние на выходные параметры процесса резания;
- исследовать процесс взаимодействия ветвей плодовых деревьев с ленточной пилой в режиме бесподпорного резания;
- обосновать технические параметры ленточного режущего аппарата для обрезки плодовых деревьев и определить эффективность машины для контурной обрезки.

Объект исследования: Процесс бесподпорного резания плодовых ветвей ленточным режущим аппаратом.

Предмет исследования: Закономерности взаимодействия ленточного режущего аппарата с ветвями плодовых деревьев в режиме бесподпорного резания.

Научная новизна работы:

- классификационные признаки современных контурных обрезчиков;
- размерные и физико-механические характеристики ветвей плодовых деревьев современных промышленных садов;
- концептуальная модель и технический образ машины для контурной обрезки с ленточным режущим аппаратом;
- математическая модель процесса взаимодействия ленточного режущего аппарата с ветвями плодовых деревьев в режиме бесподпорного резания и методы ее идентификации;
- технико-технологические параметры ленточных режущих аппаратов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Результаты теоретических исследований являются основой для совершенствования режущих аппаратов ленточного типа для обрезки плодовых деревьев. Разработаны технико-технологические требования на машину с режущим аппаратом ленточного типа для контурной обрезки плодовых деревьев в промышленном садоводстве.

Материалы исследований вошли в комплексную работу «Научное обоснование, разработка и реализация инновационных машинных технологий и технических средств в питомниководстве и садоводстве, обеспечивающих импортозамещение и продовольственную безопасность России», удостоенную премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники 2020 года. Материалы диссертационной работы представлены в проект Программа Союзного Государства «Система машин и технологий для садоводства и питомниководства».

Данная работа выполнялась в рамках программы «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» («УМНИК») по госконтрактам:

— № 8313р/13102 от 31.06.2010 «Ресурсосберегающие технологии в системе АПК», на выполнение НИОКР по теме «Разработка универсального робота манипулятора для интенсивного садоводства»;

— №10800р/16941 от 13.09.2012 «Ресурсосберегающие технологии в АПК» на выполнение НИОКР по теме «Разработка технологического модуля к роботу-манипулятору для объемной контурной обрезки плодовых деревьев».

Методология и методы исследования. Решение комплекса задач проводилось с использованием методов системной инженерии, теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления, концептуального моделирования объектов исследования. В процессе теоретических исследований использовались теории резания, теория сопротивления материалов, методы анализа размерностей, теории подобия и др.

При разработке технического облика использовались программы и графические редакторы САПР-АРМ: WinMachine, КОМПАС-3D.

Экспериментальные исследования проводились как по общеизвестным общим и частным методикам, так и на специально разработанных экспериментальных установках в лабораториях и полевых условиях.

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась методами математической статистики с использованием программ Statistica, MathCad и Excel.

Положения, выносимые на защиту:

— технико-технологические требования на проведение контурной обрезки плодовых деревьев;

— концептуальная модель и технический облик машины для контурной обрезки с ленточным режущим аппаратом;

— математическая модель взаимодействия ленточного режущего аппарата с ветвями плодовых деревьев в режиме бесподпорного резания и методы ее идентификации;

— экспериментальные данные по размерным, физико-механическим, статическим и динамическим характеристикам ветвей плодовых деревьев;

— основные параметры и режимы работы ленточного режущего аппарата;

— показатели эффективности машины для контурной обрезки с ленточным режущим аппаратом.

Личный вклад автора. Автором проведен анализ состояния вопроса, результатом которого стала постановка целей и задач исследования. Разработаны и изготовлены оригинальные экспериментальные установки. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, определены конструктивно-режимные параметры рабочего органа, проведена обработка результатов экспериментальных исследований.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства», п. 2 – разработка теории и методов технологического воздействия на среду и объекты (почва, растение, животное,

зерно, молоко и др.) сельскохозяйственного производства, п. 6 – исследование условий функционирования сельскохозяйственных и мелиоративных машин, агрегатов, отдельных рабочих органов и других средств механизации технологических процессов в сельскохозяйственном производстве, в т.ч. с применением альтернативных видов топлива; п. 7 – разработка методов оптимизации конструктивных параметров и режимов работы технических систем и средств в растениеводстве и животноводстве по критериям эффективности и ресурсосбережения технологических процессов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений подтверждена использованием известных положений фундаментальных наук, корректностью разработанных математических моделей, их адекватностью по известным критериям оценки изучаемого процесса, сходимостью полученных теоретических результатов с данными эксперимента и результатами опытно-производственной проверки технического средства.

Основные положения диссертации доложены, обсуждены и получили положительную оценку на международных, всероссийских и региональных научно-практических конференциях: ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ» (г. Мичуринск 2010-2015 гг.); ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, (г. Москва 2011 г.), ФГБОУ ВПО РГАТУ им. П.А. Костычева (г. Рязань 2011-2012 гг.); ФГБОУ ВПО СГАУ им. Н.И. Вавилова, (г. Саратов 2011-2012 г.); ФГБНУ ВИЭСХ, (г. Москва 2014 г.); ФГБНУ ВНИИС им. И.В. Мичурина, (г. Мичуринск 2016 г.) и др.

Теоретические, экспериментальные и практические результаты исследования удостоены: бронзовой медали за разработку «Машина для объемной контурной обрезки деревьев» XX международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед 2017» (Москва 2017 г.); кубка победителя в номинации «Лучшее изобретение в интересах агропромышленного комплекса» за разработку «Машина для объемной контурной обрезки деревьев» XX международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед 2017» (Москва 2017 г.); золотой медали Российской агропромышленной выставки «Золотая осень 2017г.» «За разработку машины для объемной контурной обрезки деревьев» (Москва, ВДНХ, 2017 г.).

Реализация результатов работы. Результаты научно-исследовательской работы внедрены в учебный процесс Инженерного института ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ на кафедре транспортно-технологических машин и основ конструирования, включены в курс по дисциплине «Сельскохозяйственные машины» и «Механизация сельскохозяйственного производства» для студентов, обучающихся по направлению «Агроинженерия», «Агрономия».

Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению для их дальнейшего использования в научно-технической работе по ОКР в плане реализации серийного производства машины на базе Инженерного центра ФНЦ им. И.В. Мичурина.

Результаты диссертационной работы приняты к реализации в производственной деятельности ООО «НПП «ПитомникМаш». Принято решение изготовить опытный образец машины для контурной обрезки плодовых деревьев с лен-

точным режущим аппаратом с целью проведения заводских испытаний и дальнейших мероприятий по освоению мелкосерийного производства.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 18 печатных работах, общим объемом 6.4 печ.л., в т.ч. 4 работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 4 в описаниях к патентам на полезные модели.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы, включающего 149 наименований. Работа изложена на 124 страницах, содержит 24 рисунка, 52 таблицы, 12 приложений на 32 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит основные структурные элементы: актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследований» систематизированы категории промышленных садов, типы крон плодовых деревьев, определены показатели механизированной контурной обрезки, дана классификация машин для контурной обрезки по типу режущих аппаратов и общему исполнению и т.д.

Из анализа работ Агрбы А.З., Балкарова Р.А., Бухтоярова Л.Д., Будашова И.А., Бычкова В.В., Варламова Г.П., Герасимова В.А., Завражнова А.А., Кадыкало Г.И., Кутейникова В.К., Магамедов Ф.М., Панкова Е.А., Панков Р.А., Пименов Б.И., Попиков, В.П., Привалова И.С., Соловьева Д.А., Тавасиева Р.М., Темиржанова И.О., Тханева В.А., Ульянова А.Ф., Цымбала А.А., Шекихачева Ю.А., Шомахова Л.А. и др. установлено, что рекомендуемые ими режущие аппараты дискового, ножевого и сегментного и других типов имеют ряд недостатков при проведении механизированной контурной обрезки в современных промышленных садах России.

Современные отечественные промышленные сады отличаются большим разнообразием по категории, схемам посадки, сорто-подвойным комбинациям и типам крон плодовых деревьев, что затрудняет проведение механизированной обрезки.

Исходя из научного анализа следует, что повышение качества выполнения механизированной обрезки при минимальных затратах можно достичь только с применением новых технических решений, а именно, режущих аппаратов, ранее не использованных в садоводстве.

В ходе поисковых исследований существующих режущих аппаратов было выявлено, что одним из высокоэффективных и низкочувствительных режущих аппаратов является режущий аппарат, выполненный в виде ленточной пилы, широко применяемой в деревообработке.

В отличие от процесса резания в деревообработке, где режущий элемент взаимодействует с жестко закрепленной заготовкой, имеющей только одну степень свободы или же вообще лишенной возможности перемещения, взаимодей-

ствии режущих элементов с плодовыми ветвями происходит в режиме, так называемого «бесподпорного» резания, где плодовая ветвь имеет возможность свободного перемещения.

Поставленная цель и сформулированные задачи определили структуру и содержание теоретических и экспериментальных исследований.

Во второй главе «Теоретическое исследование процесса резания ветвей плодовых деревьев» приведены разработанные технико-технологические требования, концептуальная модель и технический облик ленточного режущего аппарата, математическая модель процесса резания ветвей плодового дерева ленточной пилой и методы ее идентификации, собственные характеристики ветвей плодовых деревьев, качественные показатели выполнения обрезки.

Разработанные технико-технологические требования на проведение механизированной контурной обрезки плодовых деревьев учитывают специфические особенности современных промышленных садов, размерные характеристики плодовых ветвей и конкретизируют качественные показатели процесса обрезки.

На основании технико-технологических требований разработана концептуальная модель ленточного режущего аппарата, которая реализована в виде 3D технического облика и эскизного проекта, содержащих комплексные качественные и количественные характеристики, отражающие общие и конкретные признаки, показатели и технические свойства разработанного изделия. Также проведена привязка разработанного ленточного режущего аппарата в состав машины (агрегата) для контурной обрезки плодовых деревьев, показана на рисунке 1.

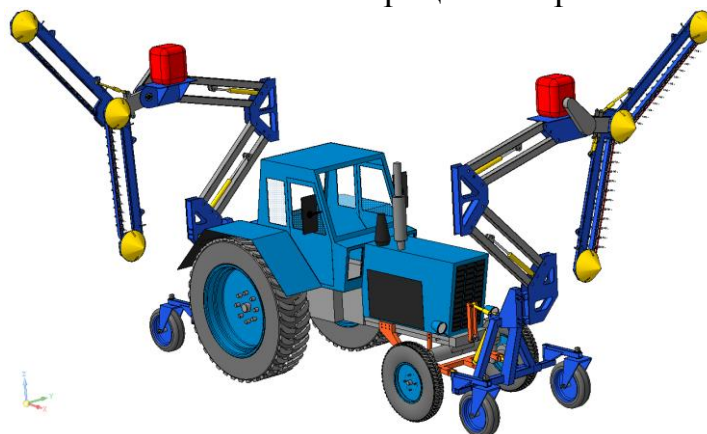


Рисунок 1 – Варианты установки машины для контурной обрезки плодовых деревьев с ленточным режущим аппаратом

Основными техническими особенностями разработанного ленточного режущего аппарата являются:

1. Режущий аппарат представляет собой гибкую стальную пилу, сваренную в кольцо, натянутой на шкивах.
2. Фиксация шкивов с системами натяжения обеспечивается стапелем, превращающим режущий аппарат в независимую модуль-систему.
3. Ориентация и относительно жесткая фиксация обрезаемых ветвей обеспечивается свободно вращающимися конусами и специальной гребенкой.
4. Шарнирно соединенные ленточные режущие аппараты имеют возможность фиксированной угловой ориентации.
5. Ленточные режущие аппараты с независимым ДВС устанавливаются на манипуляторных система, имеющих возможность установки как спереди, так и сзади трактора.
6. Привод звеньев манипуляторных систем обеспечивается гидросистемой трактора.

Новизна данного технического решения подтверждена 4 патентами на полезную модель №104013 2010г., №133682 2013г., №159386 РФ 2016г., №198816 РФ 2020г. и реализована в виде действующего режущего аппарата, в составе лабораторной установки для проведения исследовательских испытаний.

При разработке математической модели определено, что реальная система «ветвь плодового дерева – ленточная пила» образует динамическую систему, которая является пространственной с распределенными параметрами и находится под действием переменной нагрузки.

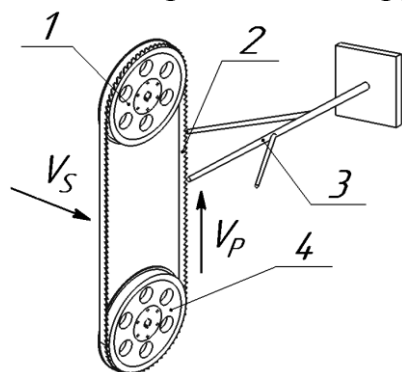


Рисунок 2 – Принципиальная схема реальной системы «ветвь плодового дерева – ленточная пила»

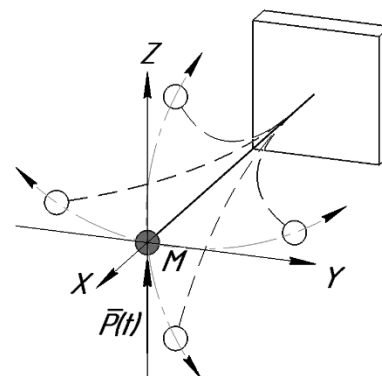


Рисунок 3 – Расчетная схема реальной системы «ветвь плодового дерева – ленточная пила»

На рисунках 2 и 3 представлены принципиальная и расчетная схемы процесса резания, где ленточная пила 2, установленная на шкивы 1 и 4 взаимодействует с ветвью яблони 3. Обычно нижний шкив 4 является приводным и задает скорость резания V_P в зависимости от его оборотов.

Процесс взаимодействия ленточной пилы с плодовой ветвью определен как процесс бесподпорного резания.

Такой процесс может описываться дифференциальными уравнениями в частных производных, решение и анализ которых методически сложен.

Для построения эквивалентной расчетной схемы и идентификации параметров модели нами приняты следующие допущения:

— **Допущение 1.** Основной процесс происходит на низких (первой гармоники) частотах. В этом случае все массы и силы можно привести в зону контакта ветви с ленточной пилой, а эквивалентная расчетная схема представляет собой одномассовую упругую систему с двумя степенями свободы, представленную на рисунке 3.

— **Допущение 2.** При рассмотрении процесса принимается гипотеза внешнего трения. В этом случае массовые диссипативные и жесткостные характеристики модели пропорциональны и имеют линейный характер.

— **Допущение 3.** Диссипативные характеристики незначительно влияют на процесс и при идентификации модели не учитываются.

— **Допущение 4.** Принимается, что процесс резания плодовой ветви (период взаимодействия ветви с пилой) является стационарным процессом, что позволяет сумму векторов движения ветви в каждый момент времени представить линейной комбинацией вектора \bar{S} и его производных $\dot{\bar{S}}$ и $\ddot{\bar{S}}$.

На основании принятых допущений выдвигаем следующую гипотезу:

— **Гипотеза 1.** Движение ветви в период ее взаимодействия с пилой происходит в режиме автоколебаний, который характеризуется и определяется собственными значениями системы.

С учетом допущений 1-4 и выдвинутой гипотезы 1 эквивалентная схема представляет собой одномассовую упругую систему с двумя степенями свободы, нагруженную силой резания $\bar{P}(t)$ переменной, как по величине, так и по направлению.

Под действием силы резания $\bar{P}(t)$ ветвь получает упругие смещения \bar{S} , скорости $\dot{\bar{S}}$ и ускорения $\ddot{\bar{S}}$, переменные во времени, которые искажают начальные режимы резания.

В этом случае дифференциальное уравнение упругих смещений ветви в процессе резания может быть представлено в виде:

$$M\ddot{\bar{S}} + B\dot{\bar{S}} + C\bar{S} = \bar{P}_p + \bar{P}(\bar{S}, \dot{\bar{S}}, \ddot{\bar{S}}) + f(t), \quad (1)$$

где M, B, C – соответственно, массовые диссипативные и жесткостные (упругие) характеристики плодовой ветви; \bar{P}_p – сила резания, с первоначально установленными режимами резания (при неподвижно зафиксированной плодовой ветви); $\bar{P}(\bar{S}, \dot{\bar{S}}, \ddot{\bar{S}})$ – детерминированная составляющая силы резания, зависящая от упругих смещений \bar{S} , скорости $\dot{\bar{S}}$ и ускорения $\ddot{\bar{S}}$; $f(t)$ – случайная составляющая силы резания от неоднородности собственных характеристик плодовой ветви.

Воспользовавшись допущением 4 о стационарности процесса, запишем уравнение процесса (1) в следующей форме:

$$M\ddot{\bar{S}} + B\dot{\bar{S}} + C\bar{S} = \Delta B\dot{\bar{S}} + \Delta C\bar{S} + f(t), \quad (2)$$

где $\Delta B, \Delta C$ – коэффициенты, учитывающие собственные характеристики плодовой ветви, удельные характеристики процесса, условия и режимы резания (кинематические параметры, тип и параметры ленточной пилы), граничные условия (диапазон варьирования факторов и параметров процесса).

Объединяя уравнения (2) и (3), имеем:

$$M\ddot{\bar{S}} + \tilde{B}\dot{\bar{S}} + \tilde{C}\bar{S} = f(t), \quad (3)$$

где $\tilde{B} = B - \Delta B$; $\tilde{C} = C - \Delta C$

Коэффициенты \tilde{B} и \tilde{C} с учетом традиционных параметров, описывающих физико-механические свойства плодовых ветвей и параметров, принятых в деревообработке, можно представить в виде следующих функций:

$$\begin{aligned} \tilde{B} &= bf(E, J, \rho, L, W, G) + \Delta bf(K, b, h, V_p, V_s, t, G), \\ \tilde{C} &= cf(E, J, \rho, L, W, G) + \Delta cf(K, b, h, V_p, V_s, t, G), \end{aligned} \quad (4)$$

где $b, \Delta b, c, \Delta c$ – независимые константы; E – модуль упругости; J – момент инерции; ρ – плотность материала; L – длина образца; W – влажность материала; K – удельная сила резания; b – ширина пропила; h – высота пропила; V_p – скорость резания; V_s – скорость подачи; t – шаг зуба ленточной пилы, G – граничные условия.

Принятая модель (3) относится к классу дифференциальных матричных неоднородных уравнений с позиционными силами. Она характеризуется системой коэффициентов $M, B, C, \Delta B, \Delta C$, которые могут допускать идентификацию модели доступными для практики методами.

С учетом принятых допущений определяем, что в перечень собственных значений динамической модели (3) входят параметры $M, B, C, \Delta B, \Delta C$, а к векторам состояния модели относятся векторы $\bar{S}, \dot{\bar{S}}, \ddot{\bar{S}}, \bar{P}_p, f(t)$.

Следуя классическому определению идентификации, как процедуры построения математической модели по априорной информации и экспериментальным данным, принимаем экспериментально-расчетный метод как основным методом идентификации и определения параметров модели.

При существующих методах измерения можно определить следующие величины:

- $\ddot{\bar{S}}$ – ускорение ветви в зоне взаимодействия с ленточной пилой, замеряется датчиками ускорений;
- \bar{S} – смещения ветви в зоне взаимодействия с ленточной пилой, замеряются визуально (например – скоростной видеосъемкой);
- M – масса плодовой ветви, определяется расчетным путем или взвешиванием;
- C – жесткость плодовой ветви, определяется расчетным путем или на нагрузочном стенде по формуле:

$$C = \frac{\Delta P}{\Delta S}. \quad (5)$$

При экспериментальном определении жесткости ветви C важным моментом является метод ее определения, т.е. на стенде задается фиксированное смещение ΔS и производится измерение ΔP .

Принимая гипотезу 1 об автоколебательном режиме движения ветви в процессе резания, можно обосновать расчетно-экспериментальный метод идентификации и определения параметров модели.

Известно, что автоколебательные режимы большинства механических систем характеризуются их собственными значениями, которые определяются на основе анализа ненагруженной системы, исследуя ее свободные колебания.

Уравнения свободных колебаний системы получаем из (3) при $\bar{P}(t) = 0$:

$$M\ddot{\bar{S}} + B\dot{\bar{S}} + C\bar{S} = 0. \quad (6)$$

Решение, соответствующее свободным колебаниям, ищем в виде:

$$\bar{S} = \bar{A}e^{j\omega t}, \quad (7)$$

где \bar{A} - вектор, характеризующий форму колебаний (амплитуду) с частотой ω , определяемой как собственная (свободная) частота колебаний системы.

С учетом допущений 1-4 упрощаем решение задачи и получаем:

$$M = \frac{C}{\omega^2} \text{ или } \omega^2 = \frac{C}{M}. \quad (8)$$

Полученное решение (8) является исходным и определяет режим автоколебаний плодовой ветви в процессе ее резания.

При определении силовых характеристик процесса нами использовались подходы и методики А.Л. Бершадского и И.Т. Глебова.

На рисунке 4 представлена кинематическая схема процесса резания плодовой ветви ленточной пилой.

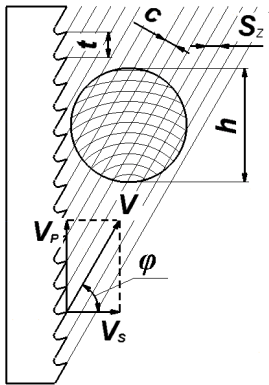


Рисунок 4 – Кинематика резания плодовой ветви ленточной пилой

Скорость подачи V_S ленточной пилы определяется скоростью движения агрегата, которая на практике составляет $V_{agr} = 1,5 \dots 2,5$ км/час ($0,42 \dots 0,69$ м/с).

Соотношение скорости резания V_P и скорости подачи V_S определяет угол наклона φ скорости главного движения V показанной на рисунке 4.

В деревообрабатывающей промышленности для оценки силовых характеристик процесса используют среднее значение силы резания.

Здесь принято следующее допущение:

– **Допущение 5.** Поперечное сечение плодовой ветви условно характеризуется описанным диаметром $d_{вет}$. Тогда по И.Т. Глебову силу резания P_P определяем по

формуле:

$$P_P = \frac{KbhV_S}{V_P}, \quad (9)$$

где V_S – скорость подачи, м/с; V_P – скорость резания, м/с; b – ширина пропила, мм; h – высота пропила равная диаметру плодовой ветви $d_{вет}$ в месте резания ($h = d_{вет}$), мм; K – среднее давление резания, Н/мм².

По А.Л. Бершадскому – по формуле:

$$P_P = \frac{Kbhc}{t}, \quad (10)$$

где c – толщина стружки, мм; t – шаг пилы, мм; K – удельная работа резания, Дж/см³ или (Н·м)/см³.

При принятых единицах измерения удельная работа резания в формуле (9) численно равна среднему давлению резания (удельной силы резания) в формуле (10), хотя физический смысл этих понятий разный:

$$K[H/мм^2] = K \left[\frac{Н \cdot м}{см^3} \right]. \quad (11)$$

Исходя из вышеизложенного определяем минимальное и максимальное значение силы резания по формулам (12 и 13):

$$[P_P]_{\min} = \frac{Kbt}{\lambda}; \quad [P_P]_{\max} = \frac{Kbd_{вет}}{\lambda}, \quad (12)$$

где λ – кинематический параметр:

$$\lambda = \frac{V_P}{V_S} = \operatorname{tg} \varphi, \quad V_S = V_{agr}, \quad V_P = \frac{\pi D n}{60 \times 1000}, \quad (13)$$

где V_S – скорость подачи (рабочая скорость машины), м/с; V_P – скорость резания, м/с; t – шаг зубьев пилы, мм; $d_{вет}$ – толщина (диаметр) ветви, мм; D – диаметр шкива, мм; n – число оборотов шкива; об/мин

Влияние факторов, относящихся к обрабатываемому материалу, параметрам режущего инструмента и режиму резания учитывают эмпирической формулой:

$$K = k_0 \cdot \alpha_{II} \cdot \alpha_w \cdot \alpha_\delta \cdot \alpha_P \cdot \alpha_h \cdot \alpha_V, \quad (14)$$

где k_0 – удельное сопротивление резанию древесины эталонным инструментом, Н/мм²; α_{II} – коэффициент, учитывающий изменение удельного сопротивления резанию в зависимости от породы; α_w – коэффициент, учитывающий влияние влажности древесины; α_δ – коэффициент, учитывающий влияние угла резания; α_P – коэффициент, учитывающий степень затупления режущей кромки инструмента; α_h – коэффициент, учитывающий влияние толщины стружки; α_V – коэффициент, учитывающий влияние скорости резания.

В практических расчетах принимается, что влияние скорости резания в пределах до 60 м/с на усилие резания не сказывается ($\alpha_V = 1$).

Понятие минимальной и максимальной силы резания нами введено на основании принятой гипотезы 1 о колебательном характере движения ветви при ее взаимодействии с ленточной пилой в режиме бесподпорного резания.

$$\left| \frac{Kbt}{\lambda} \right| \geq |P_P| \leq \left| \frac{Kbd_{ем}}{\lambda} \right|, \quad (15)$$

В этом случае абсолютное значение силы резания лежит в диапазоне т.е. от значения силы резания одним зубом при неполном контакте до значения силы резания при полном контакте зубьев пилы с плодовой ветвью.

Достаточно широкий диапазон варьирования и неопределенность входных параметров в расчетных моделях (8, 12–14), которые построены на основе традиционных (классических) зависимостей теории деревообработки и сопротивления материалов не позволяет однозначно идентифицировать и определить параметры процесса.

Известно, что весьма эффективным методом определения назначения и влияния каждого входного параметра на исследуемый процесс являются методы теории подобия и анализа размерностей, в основе которых лежит принцип использования критериев подобия (безразмерных обобщенных переменных), численно одинаковых для подобных процессов.

Путем анализа размерностей получен основной список безразмерных обобщенных переменных:

$$\frac{P_P}{Kbd_{ем}}, \frac{V_P}{V_S} = \lambda, \frac{C}{Ed_{ем}}, \frac{C}{m\omega_0^2}, \frac{Ed_{ем}}{m\omega_0^2}, \sqrt{\frac{\omega_0}{E}}, \frac{m}{\rho d_{ем}^2 L}, \frac{d_{ем}}{L}, \quad (16)$$

на основании которых определены расчетные модели процесса резания плодовых ветвей ленточной пилой, а именно:

1. Собственные характеристики плодовой ветви и характеристики процесса:

$$\frac{C}{Ed_{ем}} = f\left(\frac{d_{ем}}{L}\right), \quad \omega_0 = f\left(\frac{C}{m}\right) \quad (17)$$

2. Силовые характеристики процесса резания плодовой ветви ленточной пилой:

$$\frac{P_P}{Kbd_{вет}} = f(\lambda) \quad (18)$$

3. Качественные характеристики процесса резания (шероховатость) поверхности среза:

$$\frac{R_{m\max}}{t} = f(\lambda) \quad (19)$$

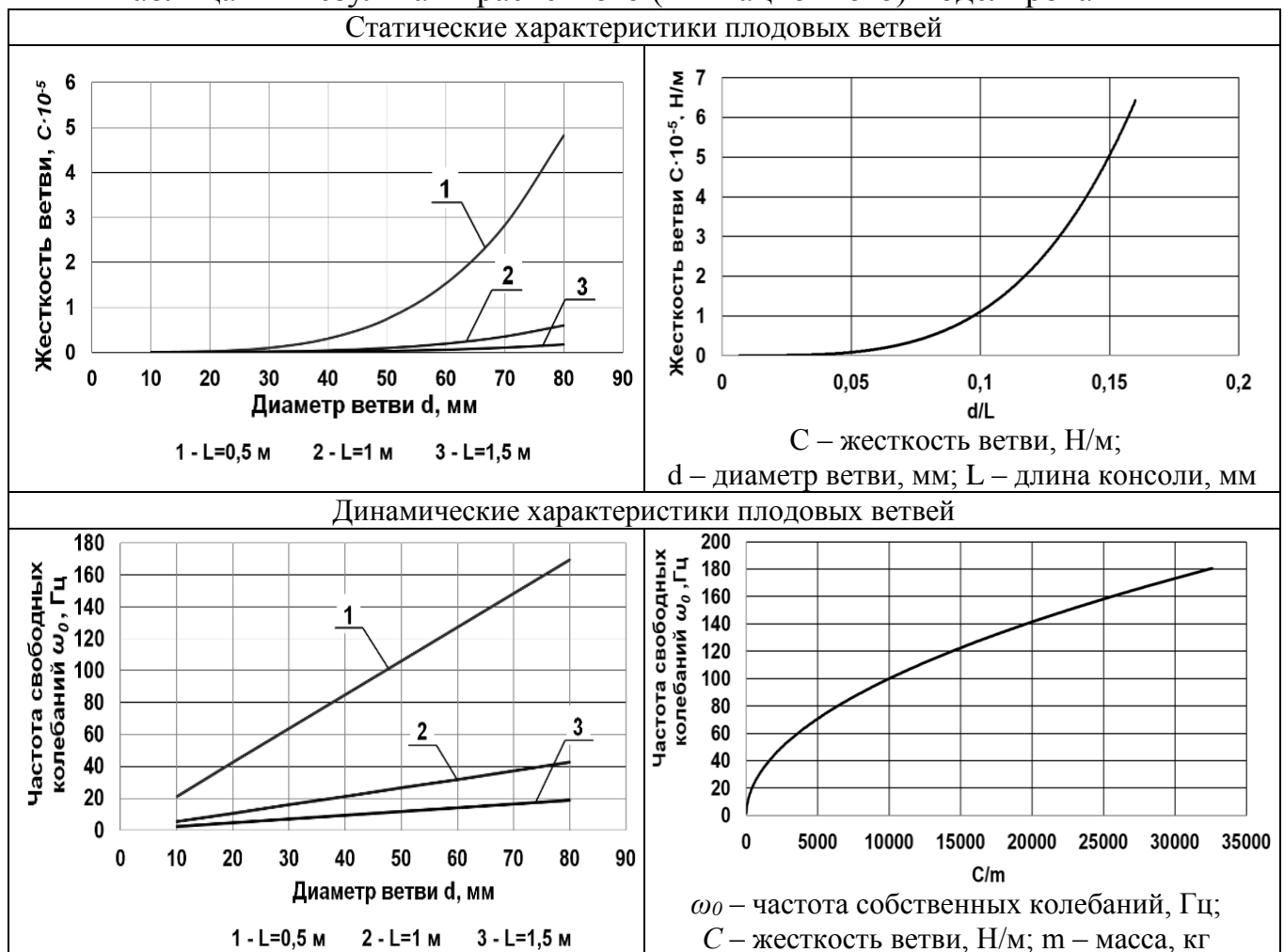
Зависимости (17–19) позволяют провести расчетное (имитационное) моделирование и идентифицировать параметры процесса.

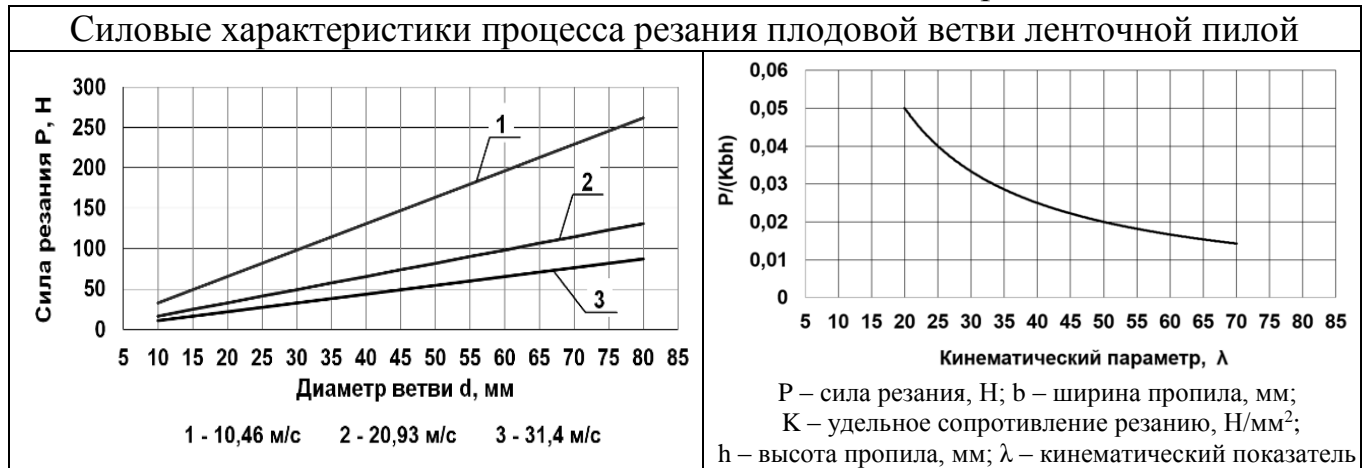
Результаты идентификации модели процесса резания плодовой ветви ленточной пилой путем расчетного (имитационного) моделирования представлены в таблице 1.

Входные параметры для расчетного (имитационного) моделирования:

Диаметр плодовой ветви $d_{вет}$, мм	10...80
Длина плодовой ветви L , м	0,5; 1,0; 1,5
Модуль упругости E , Н/м ² ×10 ⁹ (ГПа)	10
Плотность ρ , кг/м ³	720
Удельная сила резания K , Н/мм ² ;	70...160

Таблица 1 – Результаты расчетного (имитационного) моделирования

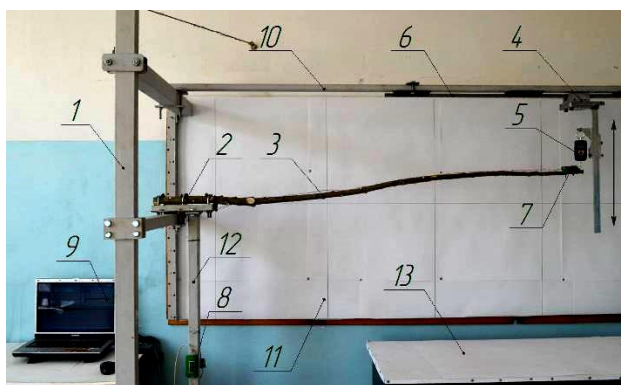




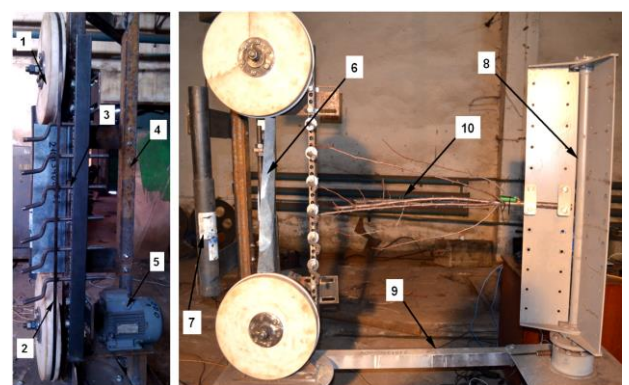
В третьей главе «Программа и методика проведения исследований» приводится описание нагрузочного стенда и лабораторной установки для определения статистических и динамических характеристик ветвей плодовых деревьев и параметров процесса их резания, методика определения частотных характеристик, методика определения шероховатости поверхности среза.

На рисунке 5 представлены разработанный нагрузочный стенд (а) и лабораторная установка (б) с макетом-демонстратором ленточного режущего аппарата.

При определении статических (жесткостных) характеристик по формуле (5) фиксация прогиба производилась при помощи штангенрейсмаса марки ШР-400. Сила нагружения на образец фиксировалась при помощи цифрового электронного безмена WeiHeng WH-A05 (динамометр) с точностью измерения 0,05 Н.



а) Общий вид нагрузочного стенда
 1 – рама; 2 – зажим; 3 – исследуемый образец; 4 – штангенрейсмас ШР-400-0,02; 5 – цифровой электронный безмен WeiHeng WH-A05; 6 – рельса; 7 – вибродатчик ZET 7152 ; 8 – регистратор сигнала ZET 7176, 9 – ПК; 10 – верхняя балка; 11 – полотно с разбивкой; 12 – опорная стойки зажима; 13 – опорный стол



б) Общий вид лабораторной установки с макетом-демонстратором ленточного режущего аппарата
 1 – Шкив; 2 – Ленточная пила; 3 – Стойка с направляющими; 4 – Рама режущего аппарата; 5 – Электропривод ; 6 – Винт натягивания; 7 – Защитный кожух; 8 – Стойка с ветками; 9 – Рама установки; 10 – Ветвь

Рисунок 5 – Лабораторное оборудование для проведения исследовательских испытаний

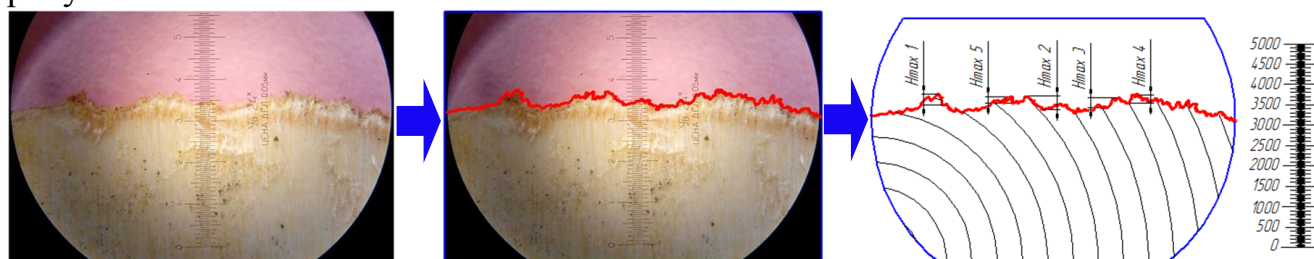
Для динамического метода исследования и определения собственной частоты колебаний плодовых ветвей использовалась система вибро-регистрации ZETLab, в которую входит регистратор данных ZET 7176 с возможностью авто-

номной записи сигнала на съемный носитель и цифровой акселерометр ZET 7152 с возможностью регистрации сигнала в трех плоскостях XYZ.

Колебания, возникающие в ветви после перерезания нити, записываются на регистратор. Сигналы, которые поступают с датчика на регистратор, обрабатываются на ПК. Для обработки сигнала с датчика ZET 7152 использовалось программное обеспечение ZETLab.

Для исследования шероховатости после обрезки разработан усовершенствованный метод фотографирования увеличенного профиля, с дальнейшей обработкой и определением параметров шероховатости с помощью графических редакторов.

Определение шероховатости среза проводилось по следующей методике: 1 – пиление; 2 – подготовка оборудования и образцов; 3 – установка, настройка оборудования; 4 – фотографирование исследуемого участка; 5 – масштабирование цифрового изображения; 6 – выделение профиля шероховатости поверхности; 7 – определение параметров шероховатости профиля рассматриваемого участка. Метод фотографирования увеличенного профиля и его исследование показаны на рисунке 6.



Рисунке 6 –Метод фотографирования увеличенного профиля и его исследование

В четвертой главе «Результаты и анализ экспериментальных данных» представлены:

1. Размерные характеристики плодовых ветвей.
2. Зависимости физико-механических и собственных характеристик плодовых ветвей от влажности древесины.
3. Собственные характеристики плодовых ветвей в разные возрастные периоды.
4. Собственные характеристики плодовых ветвей в зависимости от их состояния.
5. Шероховатость поверхности среза ленточной пилой.
6. Шероховатость поверхности среза различными типами режущих аппаратов.
7. Обобщенные результаты экспериментальных исследований процесса резания плодовых ветвей ленточным режущим аппаратом.

В результате проведения экспериментальных исследований определено, что влажность древесины оказывает существенное влияние на физико-механические свойства и собственные характеристики плодовых ветвей. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Установлено, что собственные характеристики плодовых ветвей не зависят от возрастных периодов. Основное влияние на собственные характеристики плодовых ветвей оказывают жесткостные и массовые характеристики. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Зависимости физико-механических и собственных характеристик плодовых ветвей от влажности древесины

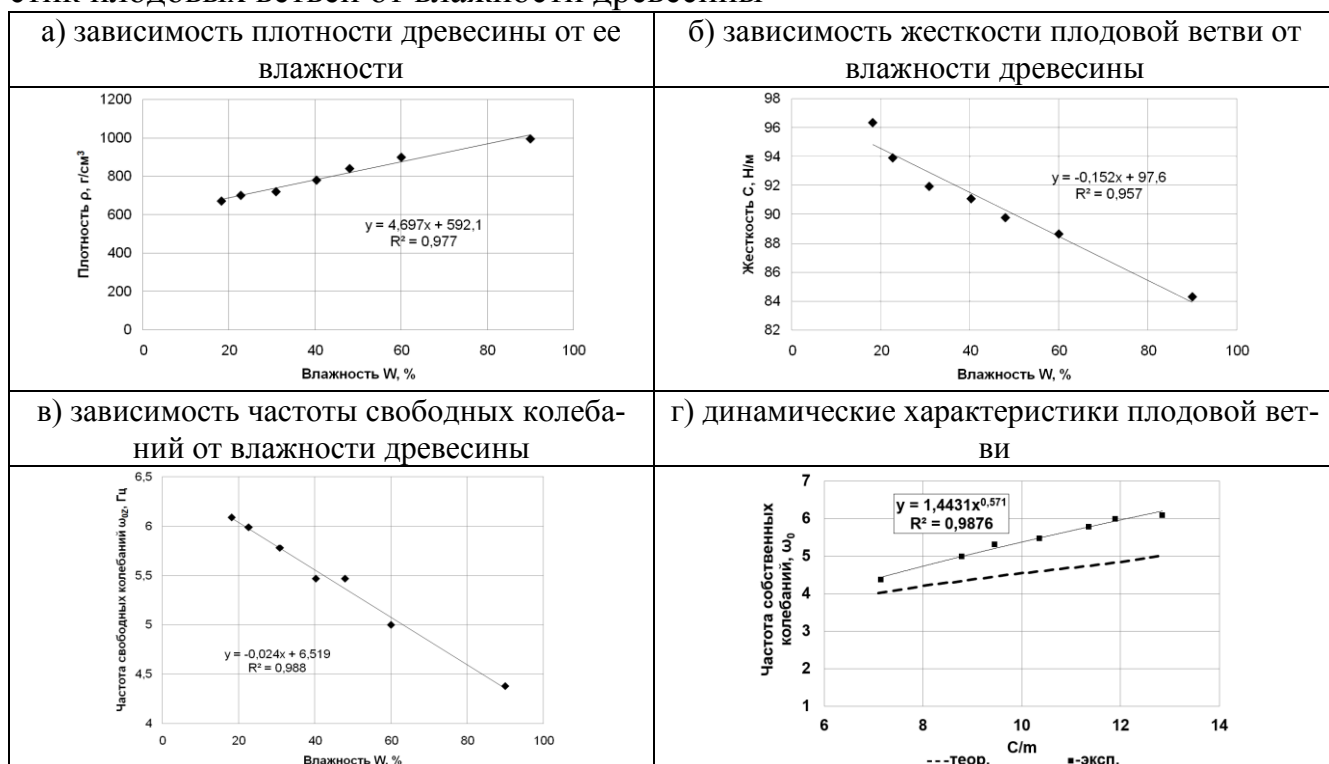


Таблица 3 – Собственные характеристики плодовых ветвей в разные возрастные периоды

Размерные характеристики			Влажность	Плотность	Собственные характеристики		
L, м	D _{max} , мм	D _{min} , мм	W, %	ρ, кг/м ³	m, кг	C, Н/м	ω _{0Y} ≈ ω _{0Z} , Гц
а) скелетная плодовая ветвь в период активного плодоношения							
1,3	0,028	0,018	90	990	0,81	194,6	5,94
б) скелетная плодовая ветвь в период затухающего плодоношения							
1,33	0,028	0,016	58	820	0,74	198,8	6,09
в) засохшая ветвь							
1,25	0,3	0,014	13	690	0,475	270,5	10,31

Установлено, что собственные характеристики плодовых ветвей определяются жесткостными характеристиками центрального проводника и массовыми самого проводника с второстепенными ветвями и листвой. Результаты исследований представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Собственные характеристики плодовых ветвей в разном состоянии

Сорт плодового дерева: Синап Орловский			Сорт плодового дерева: Уэлси		
m, кг	C, Н/м	ω ₀ , Гц	m, кг	C, Н/м	ω ₀ , Гц
а) Плодовая ветвь (замеры на дереве в саду)					
1,2	24	2,5	0,8 кг	37,5 Н/м	3,28 Гц
б) Плодовая ветвь с листвой (замеры на стенде)					
1,03	25	4,06	0,68	37,5	4,06
в) Плодовая ветвь без листвы (замеры на стенде)					
0,9	22,6	4,75	0,53	37,5	4,69
г) Плодовая ветвь-проводник (замеры на стенде)					
0,55	22,2	5,0	0,48	37,5	5,78

Установлено, что качественные показатели (шероховатость поверхности среза) обрезки ленточными режущими аппаратами в максимальной степени зависят от кинематических режимов и собственных характеристик плодовых ветвей. Результаты испытаний представлены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Шероховатость поверхности среза




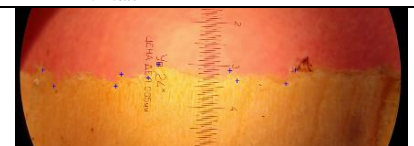

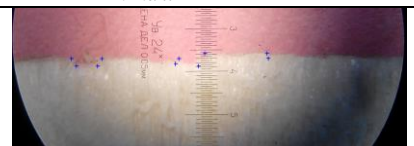
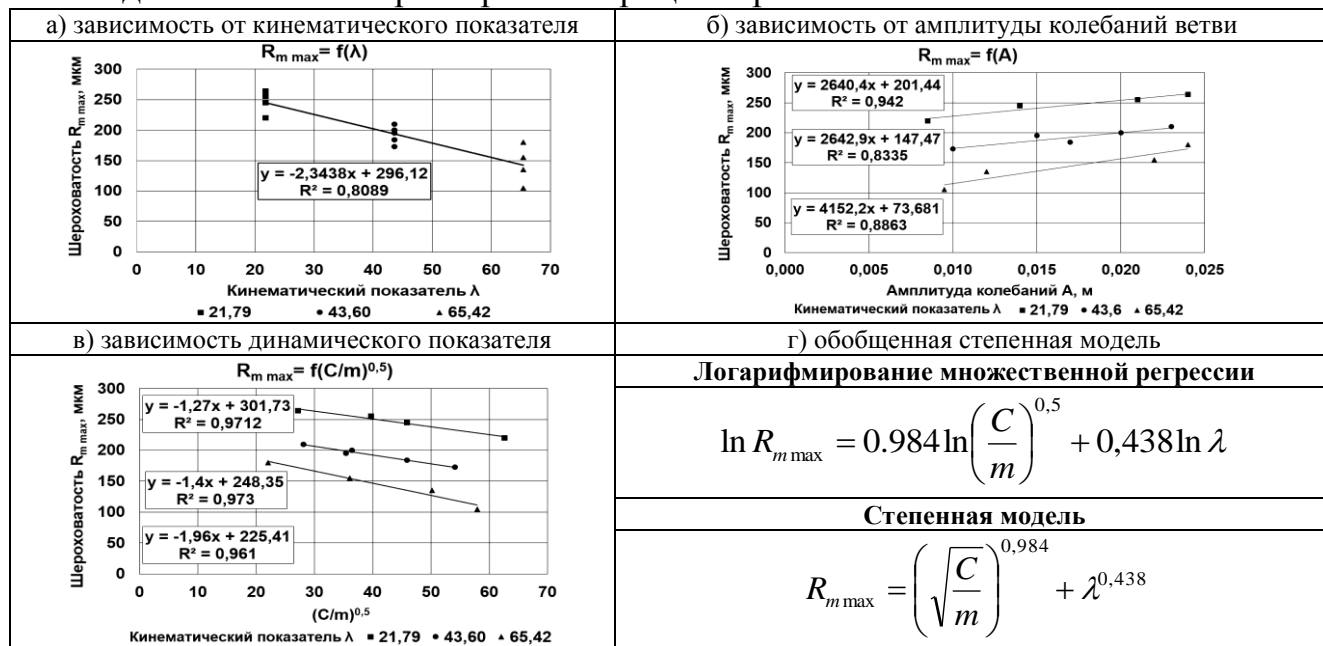
$\lambda = 21,79$	$\lambda = 43,6$	$\lambda = 65,42$
		
$R_{m \max} = 220 \dots 255$ мкм	$R_{m \max} = 160 \dots 220$ мкм	$R_{m \max} = 100 \dots 160$
		

Таблица 6 – Зависимость шероховатости поверхности среза от кинематических и динамических характеристик процесса резания



Установлено, что ленточные режущие аппараты обеспечивают наименьшие значения шероховатости среза при механизированной обрезке. Результаты испытаний представлены на рисунке 7.

Установлено, что движение плодовых ветвей при бесподпорном резании ленточными пилами происходит в режиме автоколебаний и определяется их собственными характеристиками. Результаты экспериментальных

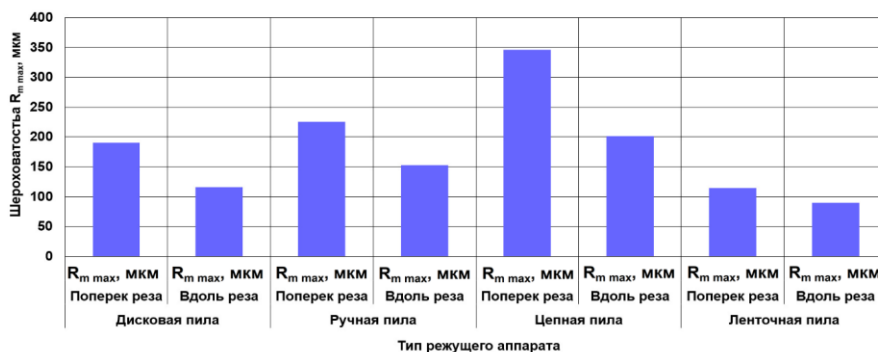


Рисунок 7 – Обобщенные гистограммы шероховатости поверхности среза различными режущими аппаратами

исследований и обобщение данных испытаний представлены на рисунке 8.

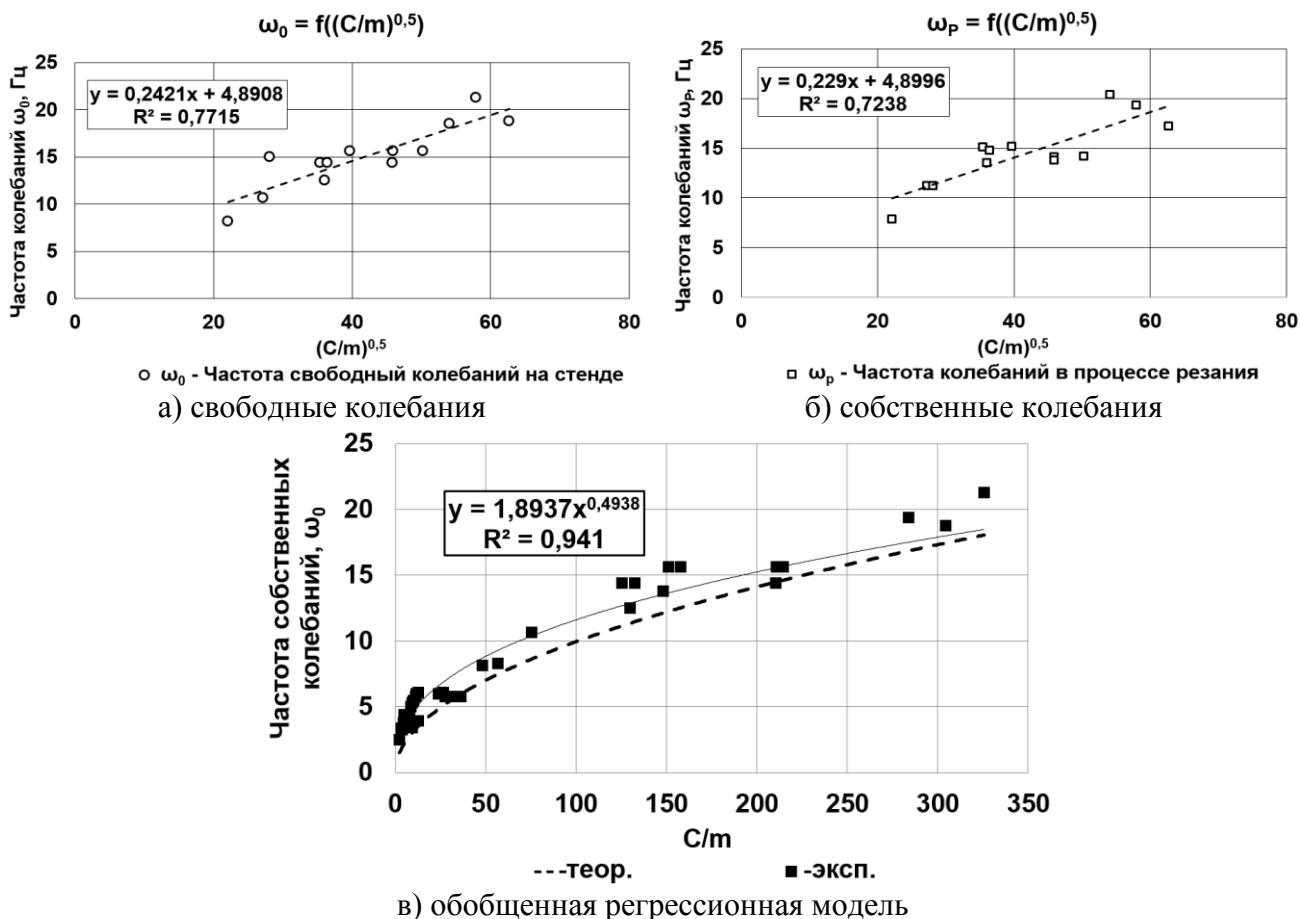


Рисунок 8 – Обобщенная регрессионная модель процесса резания плодовой ветви ленточным режущим аппаратом

В пятой главе «Экономическая эффективность использования машин для контурной обрезки плодовых деревьев с ленточным режущим аппаратом» проведен расчет технико-экономической оценки проектируемой машины для обрезки плодовых деревьев промышленных садов.

В результате проведенных расчетов установлено, что новая машина на базе трактора типа МТЗ имеет технические характеристики уровня зарубежной техники, при этом её стоимость, по сравнению с моделью FLHD 900, ниже в 3 раза за счет низкой стоимости режущего аппарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании аналитического исследования определены условия и границы контурной механизированной обрезки плодовых деревьев старых промышленных садов, подлежащих модернизации, садов экстенсивного, нормального, интенсивного и суперинтенсивного типов. Разработаны технико-технологические требования на проведение механизированной контурной обрезки плодовых деревьев, регламентирующие качественное выполнение процесса в промышленных садах различных типов, в диапазоне толщин плодовых ветвей от 10 до 80 мм и чистоте (шероховатости) поверхности среза не более $R_{m \max} 200 \dots 300$ мкм. Определено, что наилучшим образом, данным требованиям, удовлетворяет режущий аппарат ленточного типа.

2. В соответствие технико-технологических требований оформлена концептуальная модель, разработан технический облик и определены технические параметры ленточного режущего аппарата, который реализован в виде опытного образца макета-демонстратора. Вновь разработанный ленточный режущий аппарат оснащен узкой столярной ленточной пилой с шириной ленты $B = 10$ мм; толщина $m = 0,6$ мм; шаг зубьев $t = 6 \pm 0,3$ мм и высотой зубьев $h = 3$ мм. Ленточная пила режущего аппарата устанавливается на шкивы диаметром $D = 400$ мм с межцентровым расстоянием $A = 1000 \dots 1500$ мм и имеет скорость резания $V_p = 10,46 \dots 31,4$ м/с, что соответствует оборотам ведущего шкива $n = 500 \dots 1500$ об/мин. Данные режимы обеспечивают кинематический показатель резания $\lambda = 21,79 \dots 65,42$ при рабочей скорости агрегата $V_{раб.} = 0,48$ м/с (1,75 км/час).

3. При проведении теоретических и экспериментальных исследований определено, что процесс бесподпорного резания ленточной пилой происходит в режиме автоколебаний, определяемых собственными жесткостными и массовыми характеристиками плодовой ветви и не зависят от кинематического показателя. Плодовые ветви, толщиной $d = 15 \dots 30$ мм и длиной $L = 0,5 \dots 1,5$ м имеют собственные характеристики по жесткости $C = 84,31 \dots 270,5$ Н/м и по частоте колебаний $\omega_0 = 4,38 \dots 10,31$ Гц.

4. Для оценки качества процесса обрезки по чистоте поверхности среза плодовых ветвей целесообразно использовать параметр шероховатости $R_{m \max}$, который характеризует наибольшую высоту неровностей поверхности среза и для обрезки ленточным режущим аппаратом составляет $R_{m \max} = 80 \dots 115$ мкм при кинематическом показателе $\lambda = 65,42$ сила резания не превышающей 95 Н. Причем шероховатость поверхности среза и сила резания в наибольшей степени зависят от кинематического показателя резания. Уменьшение кинематического показателя в 3 раза ($\lambda =$ от 65,42 до 21,79) повышает шероховатость в 2 раза и силу резания в 3 раза.

5. Теоретические и экспериментальные исследования выявили тесную взаимосвязь собственных характеристик плодовых ветвей, режимов резания и выходных параметров процесса, которая подтверждается высокими значениями коэффициентов детерминации $R^2 = 0,72 \dots 0,97$ регрессионных зависимостей, определенных на всех циклах исследовательских испытаний. Впервые получены достоверные регрессионные модели, определяющие количественные и качественные показатели процесса обрезки от собственных характеристик плодовых ветвей и режимов резания.

6. Сравнительные исследования режущих аппаратов для механизированной контурной обрезки различных типов показали конкурентные преимущества ленточных аппаратов по качественным показателям.

7. В результате проведенных расчетов установлено, что машина с использованием вновь разработанного ленточного режущего аппарата на базе трактора типа МТЗ имеет технические характеристики уровня зарубежной техники и ниже стоимость по сравнению с зарубежной моделью MO16Q в 3 раза.

Рекомендации производству.

Для повышения эффективности и качества проведения механизированной контурной обрезки плодовых деревьев рекомендуется использовать режущий

аппарат ленточного типа.

Полученные результаты исследования рекомендуются для широкого применения в садоводческих хозяйствах, дальнейшего совершенствования конструкций машин и рабочих органов данного типа, а также для использования в учебном процессе при подготовке специалистов сельскохозяйственного направления.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Целью дальнейшей работы является разработка и изготовление совместно с Инженерным центром ФНЦ им. И.В. Мичурина, создание опытного образца машины для контурной обрезки плодовых деревьев с режущим аппаратом ленточного типа на базе трактора МТЗ 80(82) для проведения производственных испытаний и дальнейшей оптимизации конструкции.

Основные положения диссертации опубликованы в 18 работах.

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. **Земляной, А.А.** Использование электропривода в машинах для 3D контурной обрезки деревьев / А.А. Земляной, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев, Д.А. Егоров // Вестник МичГАУ. – Мичуринск: МичГАУ. – 2012. – №3. – С. 220-225.

2. **Земляной, А.А.** Новый режущий аппарат для контурной обрезки плодовых деревьев / А.А. Земляной, А.И. Завражнов, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев // Наука в центральной России. – Тамбов: ГНУ ВИИТиН, 2016. - № 4 С. 51-60.

3. **Земляной, А.А.** Исследования физико-механических свойств ветвей плодового дерева / А.А. Земляной, А.И. Завражнов, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев// Вестник Мичуринского ГАУ. – Мичуринск: Мичуринский ГАУ, 2016. – № 2 – С. 139-147.

4. **Земляной, А.А.** Определение шероховатости поверхности срезов ветвей плодовых деревьев после механизированной обрезки / А.А. Земляной, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев// Вестник Мичуринского ГАУ. – Мичуринск: Мичуринский ГАУ, 2016. – № 2 – С. 153-162.

патенты

5. Пат. №104013 РФ: МПК А01G 3/00. Машина для 3D контурной обрезки деревьев / **А.А. Земляной**, А.И. Завражнов А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев, С.В. Дьячков; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО МичГАУ, ООО «Р-технологии». – № 2010116096/21; заяв. 23.04.2010; опуб. 10.05.2011. Бюл. №13. – 3 с.

6. Пат. № 133682 РФ: МПК А01G 3/00. Машина для объемной контурной обрезки деревьев / **А.А. Земляной**, А.И. Завражнов А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев, М.Г. Гриднев; заявитель и патентообладатель ГНУ ВНИИС им. И.В. Мичурина, ООО «НПП «ПитомникМаш». – № 2013113573/13; заяв. 26.03.2013; опуб. 10.05.2011. Бюл. №30.- 3 с.

7. Пат. № 159386 РФ: МПК А01G 3/00. Машина для контурной обрезки плодовых деревьев / **А.А. Земляной**, А.И. Завражнов А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев, М.Г. Гриднев; заявитель и патентообладатель ГНУ ВНИИС им. И.В. Мичурина, ООО «НПП «ПитомникМаш». – № 2015137087/13; заяв. 31.08.2015; опуб. 10.02.2016. Бюл. №4. – 3 с.

8. Пат. № 198816 РФ: МПК А01G 3/04. Машина для контурной обрезки деревьев / **А.А. Земляной**, А.И. Завражнов А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев, В.Г. Броса-

лин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ». – № 2020100773; заяв. 09.01.2020; опуб. 29.07.2020. Бюл. №22. – 7 с.

в других изданиях и материалах конференций

9. **Земляной, А.А.** Разработка универсального робота-манипулятора для интенсивного садоводства / А.А. Земляной, А.А. Завражнов // *Материалы 63-й научно-практической конференции студентов и аспирантов МичГАУ.* – Мичуринск – Наукоград РФ, 2011 – С. 137-142.

10. **Земляной, А.А.** Использование электропривода в машинах для интенсивного садоводства (на примере машины для 3D контурной обрезки плодовых деревьев) / А.А. Земляной, А.А. Завражнов, Д.А. Курочкин// *Сборник научных трудов ВИМ.* – М.: ВИМ, 2011. – том №2. – С. 461-470.

11. **Земляной, А.А.** Разработка универсального робота-манипулятора для интенсивного садоводства// *Сборник научных трудов по материалам 3 тура Всероссийского конкурса на лучшую научную работу.*– Саратов: КУБиК, 2011.– С. 33-37.

12. **Земляной, А.А.** Разработка и исследование машины для объемной контурной обрезки плодовых деревьев / А.А. Земляной, А.А. Завражнов // *Материалы 64-й научно-практической конференции студентов и аспирантов МичГАУ.* – Мичуринск: МичГАУ, 2012. – С. 152-159.

13. **Земляной, А.А.** Техническое средство для объемной контурной обрезки деревьев/ А.А. Земляной, А.А. Завражнов // *Материалы 65-й научно-практической конференции студентов и аспирантов МичГАУ.* Мичуринск – Наукоград РФ, 2013. С 117-122.

14. **Земляной, А.А.** Полученные результаты разработки машины для объемной контурной обрезки деревьев/ А.А. Земляной, А.И. Завражнов, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев// *Инновации в сельском хозяйстве.*– М.: ГНУ ВИЭСХ, 2014.– №5 (10).– С. 28-23.

15. **Земляной, А.А.** Результаты исследования режущего аппарата роторного типа для механизированной контурной обрезки плодовых деревьев/ А.А. Земляной, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев, А.С. Пятов // *Материалы 66-й научно-практической конференции студентов и аспирантов МичГАУ.* Мичуринск – Наукоград РФ, 2014. – Мичуринск: МичГАУ, 2014. – С 27-35.

16. **Земляной, А.А.** Разработка робота манипулятора для проведения 3D контурной обрезки плодовых деревьев / А.А. Земляной, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев // *Материалы международной научно-практической конференции «Робототехника в сельскохозяйственных технологиях» 10-12 ноября 2014 Мичуринск-наукоград РФ.* – Мичуринск: ФГБОУ ВПО МичГАУ, 2014. – С 303-311.

17. **Земляной, А.А.** Машина для механизированной контурной обрезки плодовых деревьев // А.А. Земляной, А.И. Завражнов, А.А. Завражнов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства.* – М.: МЭСХ, 2016. – № 2. – С. 2-6.

18. **Земляной, А.А.** Инновации в промышленном садоводстве. Результаты испытания ленточного режущего аппарата для контурной обрезки плодовых деревьев / А.А. Земляной, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев, В.Г. Бросалин / *«Научные основы развития современного садоводства в условиях импортозамещения».* - Воронеж: Кварта, 2016. – С. 168-174.

Отпечатано в типографии
ООО «БиС»
Подписано в печать 20.04.2022 г. Формат 60x84 ¹/₁₆,
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 1,0
Тираж 100 экз. Ризограф
Заказ № 53

Типография ООО «БиС»
г. Мичуринск, ул. Липецкое шоссе, д. 95а

