

УТВЕРЖДАЮ
Ректор
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Воронежский государственный
лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»



М.В. Драпалюк

2025 года

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Воронежский
государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

на диссертационную работу

Клубничкина Владислава Евгеньевича

«Методы разработки беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин»,
представленную к защите на соискание

ученой степени доктора технических наук по специальности

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины

2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Актуальность работы

Во всём мире сохраняется тренд на увеличение лесозаготовки, по оценкам, к 2030 году её годовой объём может достигнуть порядка 4,5 млрд м³. Для России, располагающей значительными возобновляемыми лесными ресурсами, целевые ориентиры «Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 г.» предусматривают наращивание заготовки до 290 млн м³ в год, в том числе за счёт вовлечения участков со слабонесущими грунтами.

Эти планы, а также приоритеты научно-технологического развития страны, включая интеллектуальные транспортные системы и автономные средства требуют внедрения решений, повышающих производительность, экологичность и

безопасность лесозаготовок. Традиционные технологии несут высокий риск травм и влияние вредных производственных факторов, что делает переход к беспилотным системам практически необходимым. Роботизация уже доказала эффективность в сельском хозяйстве и горнодобывающей отрасли, однако в лесном комплексе её применение пока ограничено, что формирует значимый потенциал для развития.

В настоящее время научно обоснованные методы формирования технического облика беспилотных трелевочных машин (БПТМ) отсутствуют, что **является ключевой научной проблемой**. Для продвижения в решении поставленной задачи необходимы исследования, направленные на обоснованный выбор компоновки машин, подбор оптимальных схем технологического оборудования и трансмиссий, оценку подвижности, а также на формирование законов управления движением БПТМ.

Предложенные в работе коллаборативная технология заготовки, комплекс математических моделей и виртуальная лесосека обеспечивают повышение безопасности, энергоэффективности и точности трелевочных операций, что соответствует современным требованиям рационального лесопользования и охраны окружающей среды.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов и заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Работа изложена на 326 листах машинописного текста, содержит 227 рисунков, 30 таблиц. Список литературы содержит 229 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, приведено краткое содержание выполненных исследований, определена научная проблема, сформулирована цель работы, задачи исследования, положения научной новизны, практическая значимость, содержание исследований по главам, основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу условий эксплуатации лесных трелевочных машин, эксплуатационных показателей и формированию основных значимых параметров трелевочных машин. На основе проведенного анализа современного

состояния проблемы определены основные измерители эксплуатационных свойств трелевочных машин, которые будут использоваться для сравнения вариантов колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин. Разработана коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами, позволяющая повысить безопасность и энергоэффективность при выполнении операций трелевки, экономическую эффективность лесозаготовок.

Глава 2 посвящена разработке имитационных математических моделей движения колесных и гусеничных БПТМ с различным технологическим оборудованием, отличающихся возможностью моделирования перемещений трелеваемой пачки деревьев и хлыстов в полупогруженном состоянии. Для выбора приоритетного технического решения БПТМ определены показатели подвижности, основанные на методах с использованием имитационного математического моделирования. Использован подход, основанный на системе уравнений динамики твердых тел, позволяющий автоматически формировать систему уравнений для любой конфигурации механической системы.

Глава 3 содержит экспериментальные исследования, направленные на оценку точности и адекватности математических моделей движения колесных и гусеничных БПТМ с полупогруженной пачкой. Сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования подтвердило точность разработанной модели. Относительная погрешность по координатам точек корпуса машины и пачки не превысила 16%. Разработанная модель пригодна для исследования динамики криволинейного движения БПТМ как с пачкой, так и без нее на опорном основании «дернистый грунт».

Глава 4 посвящена формированию программы испытаний на виртуальной лесосеке для определения основных значимых показателей колесных и гусеничных БПТМ. Разработана параметризованная модель виртуальной лесосеки с характеристиками дорожно-грунтовых условий, включающая участки для определения показателей БПТМ: профильной проходимости, маневренности, автономности, устойчивости, эффективности выполнения технологических операций.

Глава 5 представляет разработанные законы управления движением беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин. Эффективность предложенных законов подтверждена путем имитационного математического моделирования. Разработаны:

Закон автоматизированного движения трелевочной машины по заданной траектории.

Закон управления движением сочлененной колесной трелевочной машины по заданной траектории, использующий комбинированный метод, сочетающий управление по отклонению и программное управление.

Закон управления движением гусеничной трелевочной машины по заданной траектории, основанный на анализе отклонений от траектории по расстоянию и углу.

Глава 6 посвящена комплексному определению рациональных конструктивных параметров. Разработана база данных типовых условий эксплуатации лесозаготовительных машин. Методом компьютерного моделирования, основанного на законах управления, построены траектории движения колесных и гусеничных БПТМ по трелевочному волоку. Определены рациональные схемы механизмов передачи-поворота для гусеничных БПТМ. Наилучшие показатели управляемости достигнуты при использовании двухпоточного дифференциального механизма с гидрообъемной передачей (ГОП) в параллельном потоке мощности.

Глава 7 содержит сравнительное технико-экономическое исследование коллаборативной технологии заготовки древесины. Ключевые результаты демонстрируют ряд значительных преимуществ БПТМ: повышение производительности в среднем на 20%, исключение затрат на зарплату оператора (до 3,1 млн руб. в год), снижение энергопотребления, оптимизацию расхода топлива (экономия 15750 л/год), уменьшение выбросов CO₂ на 57 тонн в год.

В заключении приводятся основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии лесозаготовок, направленное на повышение энергоэффективности и безопасности работ путем применения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин.

Личное участие соискателя учёной степени в получении результатов, изложенных в диссертации

Научная работа выполнена соискателем лично, а именно:

1. Разработана коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами.
2. Разработан комплекс математических моделей движения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин при выполнении трелевочных операций.
3. Проведены экспериментальные исследования с целью оценки адекватности и точности математических моделей движения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин с пачкой хлыстов в полупогруженном состоянии.
4. Разработаны законы управления движением беспилотными трелевочными колесными и гусеничными машинами по заданным траекториям.
5. Разработана виртуальная лесосека для моделирования трелевочных операций с параметризованными характеристиками дорожно-грунтовых условий.
6. Разработан метод определения рациональных технических характеристик трансмиссии и технологического оборудования БПТМ с использованием виртуальной лесосеки и моделирования трелевочных операций.
7. Проведено сравнительное технико-экономическое исследование коллаборативной технологии заготовки древесины с использованием имитационного математического моделирования рабочих процессов.

В работе отсутствует заимствованный материал без ссылок на авторов и источники заимствования. Подготовка публикаций, выступлений в ряде случаев проводилась совместно с соавторами, при этом вклад соискателя является определяющим.

Научная новизна работы

1. Разработана коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами, отличающаяся применением робототехнических комплексов при трелевке и порожнем ходе в автономном режиме, при работе на лесосеке и верхнем складе в дистанционно

управляемом режиме, позволяющих повысить безопасность труда и энергоэффективность при выполнении операций трелевки и экономическую эффективность лесозаготовок.

2. Разработаны новые математические модели движения трелевочных беспилотных колесных и гусеничных машин, отличающиеся возможностью моделирования перемещений трелеваемой пачки хлыстов в полупогруженном состоянии с учетом её колебаний.

3. Разработаны законы управления движением беспилотными трелевочными колесными и гусеничными машинами, позволяющие:

- учитывать влияние пачки хлыстов на динамику машин с учетом особенности трелевочного оборудования и конструктивного исполнения БПТМ;
- осуществлять энергоэффективное и безопасное беспилотное движение по волоку;
- повысить экологическую безопасность при выполнении маневров на лесосеке, путем предотвращения выезда за пределы трелевочного волока.

4. Разработана параметризованная математическая модель условий эксплуатации – «виртуальная» лесосека с характеристиками дорожно-грунтовых условий, отличающаяся использованием зависимости от числа проходов БПТМ.

5. Разработаны новые методы определения рациональных технических характеристик трансмиссий и технологического оборудования БПТМ, отличающиеся моделированием трелевки на виртуальной лесосеке и движения без нагрузки с целью повышения безопасности и энергоэффективности транспортных операций и расчета нагруженности агрегатов и узлов машин.

Научная и практическая ценность диссертации

Научная ценность диссертационной работы соискателя заключается в решении научной проблемы формирования технического облика и разработки методов проектирования беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин для лесозаготовительных работ.

При этом решены следующие научные задачи:

1. Разработана коллаборативная технология заготовки древесины с использованием беспилотных колесных и гусеничных машин, сочетающая

автономное движение по волоку и дистанционное управление на лесосеке и верхнем складе.

2. Создан комплекс имитационных математических моделей движения БПТМ с полупогруженной пачкой хлыстов, учитывающих динамику машины, движителя и пачки, а также взаимодействие с опорной поверхностью.

3. Разработаны законы управления движением БПТМ по заданной траектории, обеспечивающие энергоэффективность, безопасность и предотвращение выезда за пределы волока.

4. Разработана параметризованная модель «виртуальной лесосеки» с изменяемыми дорожно-грунтовыми условиями, учитывающая влияние числа проходов техники.

5. Предложены методы определения рациональных характеристик трансмиссий и технологического оборудования БПТМ на основе моделирования трелевочных операций в виртуальной среде.

Практическая ценность диссертационной работы:

1. Разработаны программные реализации математических моделей движения колесных и гусеничных БПТМ при трелевке на виртуальной лесосеке с целью прогнозирования энергоэффективности операций и нагруженности элементов лесозаготовительных машин на этапе проектирования.

2. Даны рекомендации к выбору технических характеристик колесных и гусеничных БПТМ с различным трелевочным оборудованием для хлыстовой заготовки древесины.

Полученные результаты работы внедрены в ряде ведущих машиностроительных и лесозаготовительных предприятий (ПАО «КАМАЗ», АО «Курганмашзавод»-«Рубцовск», ООО Завод «Алтайлесмаш», ООО «ЛЕСТЕХ-ФИНАНС») и в учебном процессе МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана при подготовке бакалавров и магистров.

Теоретические положения и результаты исследований, изложенные в диссертации, могут быть использованы в образовательных программах ВУЗов при подготовке студентов по направлениям «Технологические машины и оборудование» и «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Степень обоснованности и достоверности научных положений

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируются на сравнительной оценке данных теоретических и экспериментальных исследований динамики БПТМ, а также на использовании апробированных методов имитационного математического моделирования.

Полнота изложения материалов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на: I-м Европейском лесопромышленном форуме молодежи. Воронеж, 2014; International seminar Soil trafficability- challenges for soils and vehicles. Tartu (Estonia), 2015; 48th International Symposium on Forestry Mechanization. Linz (Austria), 2015; 13th ISTVS European Conference. Rome (Italy), 2015; Международном молодежном симпозиуме «Современные проблемы математики. Методы, модели, приложения». Воронеж, 2015; 8th ISTVS Americas regional conference. Detroit (USA), 2016; 49th International Symposium on Forestry Mechanization: «From Theory to Practice: Challenges for Forest Engineering». Warsaw (Poland), 2016; XVI Международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки». Нижний Новгород, 2017; 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS. Budapest (Hungary), 2017; Ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Мытищи, Московская обл. 2017-2025; 102-ой Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы помощи водителю: разработка, исследование, сертификация». Нижний Новгород, 2018; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2018-2020). Севастополь, 2018-2020; Научно-техническом семинаре «Подвижность транспортно-технологических машин». Нижний Новгород, 2018-2020; Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова «Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса». Воронеж 2020; Всероссийской научно-

практической конференции «Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития». Воронеж, 2022; Всероссийской научно-практической конференции «Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития», Воронеж, 2023; XX и XXI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса». Вологда, 2022, 2023; 114-я международная научно-техническая конференция «Перспективы развития наземных транспортных средств и технологий транспортной логистики». Нижний Новгород, 2023.

Полнота опубликованных результатов

По теме диссертации опубликовано 95 научных работ, в том числе 42 – в изданиях из перечня ВАК РФ, 18 – индексируемых в Scopus, 4 патента на изобретения и полезные модели, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Публикации в полной мере отражают основные научные результаты диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать производителям лесозаготовительной техники при проектировании новых моделей беспилотных трелевочных машин и модернизации существующих лесозаготовительных машин.

Лесозаготовительным предприятиям для внедрения коллаборативной технологии с целью повышения производительности, снижения себестоимости и улучшения безопасности работ.

Образовательным учреждениям в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов по направлениям, связанным с технологическими машинами и оборудованием, технологией лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, наземными транспортно-технологическими средствами.

Замечания

По диссертационной работе следует отметить ряд недостатков:

1. В разделе 1.1.8 автором проделана значительная работа по формированию облика беспилотных трелевочных машин (БПТМ) и приведены

конкретные параметры базовых платформ (ТТ-4М, «Онежец-300», John Deere 748Н) с указанием рейсовой нагрузки, габаритов и т.д. Однако отсутствует систематизированное обоснование выбора именно этих значений.

2. Компонувочные решения охватывают широкий спектр (колёсные/гусеничные, разные типы трелевочного оборудования), но критерии выбора «лучшего» решения для конкретных условий лесосеки полезно сделать более формализованными.

3. Исследования проводились только на одном типе грунта – дернистом. Нет данных по песчаным, заболоченным, замерзшим и другим типам. Нет информации о повторяемости экспериментов, сколько серий проводилось, статистическая обработка и доверительные интервалы, что не позволяет объективно оценить достоверность заявленной погрешности в 16%.

4. Обоснование выбора конкретных численных значений параметризованных характеристик дорожно-грунтовых условий (например, в Таблице 25) представлено не в полном объеме, что снижает воспроизводимость и надежность виртуальных испытаний.

5. В работе подробно описаны вариативность ДГУ и деформации колеи, но нет расчётного индекса «воздействия на почву» в сравнении сценариев и компоновок. Микропрофиль виртуального участка показан иллюстративно, но без статистики повторяемости. Есть рисунки профилей и фрагменты участка, однако полезно было бы привести распределения неровностей, корреляции по колеям и вариативность по сезонам и влажности.

6. Виртуальная лесосека параметризована по числу проходов БПТМ, но это может игнорировать стохастические факторы реального леса. Законы управления показывают отклонение от траектории не более 12%, но без учета сбоев сенсоров или ИИ в автономном режиме, что критично для беспилотных систем. Эффективность разработанных законов управления не подтверждена количественными сравнениями с базовыми или альтернативными алгоритмами.

7. Недостаточно проработан вопрос экологической безопасности. Хотя в работе заявлено повышение экологической безопасности, не приведены количественные оценки влияния БПТМ на лесные почвы, растительность и

подрост при многократных проходах. Не учтены возможные негативные последствия движения за пределами волока.

8. Недостаточно внимания уделено ключевым узлам машин. Например, слабо раскрыты вопросы надёжности и динамики узла сочленения для шарнирно-сочленённых машин, хотя этот узел критически важен для управляемости и долговечности.

9. В лесной отрасли беспилотные системы сталкиваются с плохой связью в удаленных районах, что в работе не анализируется глубоко. Кроме того, фокус на хлыстовой технологии ограничивает обобщение на сортиментную заготовку.

Заключение о соответствии диссертации критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней»

Диссертация Клубничкина Владислава Евгеньевича «Методы разработки беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин» представляет собой самостоятельную, завершённую научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям.

В диссертации решена значимая и актуальная научно-техническая проблема формирования технического облика и методов проектирования беспилотных трелевочных машин для лесного комплекса. Разработанные коллаборативная технология, комплекс математических моделей, законы управления и методы виртуальных испытаний направлены на повышение производительности, безопасности, энергоэффективности и экологической устойчивости лесозаготовок, что имеет важное значение для реализации стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 4.3.4 - Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (технические науки) и научной специальности 2.5.11 - Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки). Содержание автореферата полностью отражает существо и основные результаты диссертации.

Настоящий отзыв рассмотрен и единогласно одобрен на заседании кафедры «Лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» протокол №2 от 29.10.2025 г.

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, дом 8

подпись Сергеев Н. С.
УДОСТОВЕРЮ:
Секретарь В. В. В.
« 29 10. 20 1957 »

12