

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента Молева Юрия Игоревича профессора кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», на диссертационную работу Клубничкина Владислава Евгеньевича на тему «Методы разработки беспилотных колесных и гусеничных трелёвочных машин», представленную к защите в диссертационный совет 24.2.331.10 на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 4.3.4 - Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (технические науки) и 2.5.11 - Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки).

Актуальность темы

Актуальность темы диссертационной работы Клубничкина В.Е. обусловлена комплексом стратегических, экономических и технологических факторов, определяющих современное развитие лесного комплекса России и мира.

Во-первых, работа выполнена в контексте глобального роста объемов лесозаготовки, которые, по прогнозам, к 2030 году достигнут 4,5 млрд м³. Для России, обладающей крупнейшими в мире возобновляемыми лесными ресурсами, реализация стратегических задач, закрепленных в «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года», напрямую связана с необходимостью увеличения объемов заготовки древесины до 290 млн м³ в год. Это требует освоения новых, зачастую труднодоступных лесных массивов со слабонесущими грунтами, где применение традиционной техники малоэффективно или сопряжено с повышенными экологическими рисками.

Во-вторых, актуальность подтверждается острой необходимостью внедрения интеллектуальных транспортных систем и автономных транспортных средств, отнесенных к приоритетным направлениям научно-технологического развития РФ. Лесозаготовка традиционно относится к отраслям с высоким уровнем травматизма и тяжелыми условиями труда. Внедрение беспилотных технологий позволяет не только минимизировать человеческий фактор и повысить безопасность, но и решить проблему дефицита квалифицированных операторов.

В-третьих, в то время как роботизированные системы активно внедряются в сельском хозяйстве, горнодобывающей промышленности и строительстве, в лесной отрасли наблюдается значительное отставание. Научно обоснованные методы формирования технического облика беспилотных трелёвочных машин (БПТМ) до настоящего времени отсутствовали. Таким образом, представленная диссертационная работа направлена на решение ключевой научной проблемы, обусловленной объективными требованиями времени: переходом к интенсивной модели лесопользования, основанной на цифровизации, роботизации и принципах устойчивого развития.

Степень обоснованности и достоверности

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.

Научная новизна и практическая значимость результатов диссертации, возможные пути их использования

Научная новизна работы заключается в комплексном решении фундаментальной научно-технической проблемы – создания методологии разработки беспилотных трелёвочных машин для лесозаготовительного комплекса. Конкретные новые научные результаты, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. **Впервые разработана коллаборативная технология заготовки древесины**, которая характеризуется гибридным использованием автономного и дистанционно управляемого режимов работы БПТМ. Новизна заключается в зональном распределении ответственности между операторами валочно-пакетирующей машины и верхнего склада, а также в интеграции беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для предварительной разведки трассы (волока), что формирует целостный робототехнический комплекс.

2. **Создан комплекс оригинальных имитационных математических моделей** движения колесных и гусеничных БПТМ с пачковым захватом и самозажимным коником. Отличительной особенностью моделей является возможность моделирования динамики полупогруженной пачки хлыстов с учетом её колебаний и взаимодействия с опорной поверхностью, что ранее не реализовывалось в подобной полноте.

3. **Разработаны новые законы управления движением БПТМ**, адаптированные к специфике лесозаготовительных операций. Для шарнирно-сочлененных колесных машин предложен комбинированный закон, сочетающий управление по отклонению и программное управление. Для гусеничных машин разработан закон, учитывающий влияние пачки на динамику поворота и минимизирующий отклонение от траектории, что предотвращает повреждение подроста и почвенного покрова.

4. **Впервые предложена параметризованная модель «виртуальной лесосеки»** как инструмент для проектирования и испытаний. Её новизна заключается в учете деградации дорожно-грунтовых условий в зависимости от числа проходов БПТМ, что позволяет проводить оценки проходимости и энергоэффективности на этапе проектирования.

5. **Разработаны новые методы определения рациональных технических характеристик** трансмиссий и технологического оборудования БПТМ, основанные на имитационном моделировании в условиях виртуальной лесосеки, что позволяет оптимизировать конструкцию на ранних стадиях проектирования.

Практическая значимость работы имеет ярко выраженный прикладной характер и подтверждается актами внедрения. Основные пути использования результатов:

- **Для машиностроительных предприятий (ПАО «КАМАЗ», АО «Курганмашзавод», ООО «Алтайлесмаш» и др.):** Разработанные методики, модели и законы управления позволяют сократить сроки и стоимость проектирования новых моделей БПТМ, оптимизировать их конструкцию под конкретные эксплуатационные условия и существенно повысить их конкурентоспособность.

- **Для лесозаготовительных компаний:** Внедрение коллаборативной технологии обеспечивает прямой экономический эффект за счет: повышения производительности на 20%; исключения затрат на зарплату оператора трелёвки (до 3,1 млн руб. в год); снижения расхода топлива (экономия 15750 л/год) и энергопотребления (86 тыс. кВт·ч/год); уменьшения выбросов CO₂ на 57 тонн в год.

- **Для образовательного процесса:** Теоретические положения и методики внедрены в учебный процесс ведущих вузов, что способствует подготовке высококвалифицированных кадров для цифровой трансформации лесного комплекса.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, обеспечивается применением современного методологического аппарата и всесторонней экспериментальной проверкой.

Обоснованность проведенных исследований подтверждается:

- Корректностью исходных допущений и предпосылок, основанных на глубоком анализе современных достижений в области динамики машин, теории управления и технологий лесозаготовок.

- Использованием апробированных и общепризнанных методов исследования, включая методы математического моделирования систем твердых тел, теории автоматического управления (ПИД-регулирование), планирования экспериментов и статистической обработки данных.

- Применением современных программных комплексов для имитационного моделирования («Универсальный механизм», «Adams»), что позволяет адекватно описывать сложные динамические процессы взаимодействия машины, рабочего оборудования, пачки и грунта.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается:

- Результатами натурных экспериментов, проведенных с использованием высокоточного измерительного оборудования (системы спутникового позиционирования Racelogic Vbox, GPS-приемники, индуктивные датчики). Эксперименты проводились на реальных трелёвочных тракторах (ТБ-1М, ЛТ-187, скиддер John Deere, «Вепрь 4x4») в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

- Сравнительным анализом данных математического моделирования и натурных испытаний, который показал высокую степень их соответствия. Максимальное расхождение по траекториям движения не превысило 16%, а по угловым скоростям ведущих колес – 8%, что находится в пределах допустимой погрешности для задач данного класса.

- Верификацией математических моделей на различных типах машин и технологического оборудования, что демонстрирует универсальность предложенных подходов.

- Внедрением результатов работы на промышленных предприятиях, что является высшей формой подтверждения их достоверности и практической ценности.

Таким образом, можно констатировать, что научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными, достоверными и надежно защищенными совокупностью использованных методов и проведенных экспериментальных исследований.

Общая характеристика работы

Структурно работа состоит из введения, семи глав, общего заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 229 наименований и приложений. Диссертация изложена на 326 страницах, содержит 227 рисунков и 30 таблиц, что свидетельствует о глубине проработки материала и наглядности представления результатов.

Во введении всесторонне обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, положения научной новизны, а также практическая значимость исследования. Чётко определены объект, предмет и методы исследования.

В первой главе проведён глубокий и критический анализ современного состояния проблемы, рассмотрены отечественные и зарубежные разработки в области трелёвки леса, взаимодействия движителей с грунтом и систем управления. На основе этого анализа сформирован научный задел и определена ниша для проведения собственных исследований, а также разработана и визуализирована авторская коллаборативная технология заготовки древесины.

Вторая глава посвящена разработке комплекса имитационных математических моделей. Автор демонстрирует глубокое понимание физики процессов, предлагая расчётные схемы взаимодействия гусеничных и колесных движителей с грунтом, а также динамики пачки хлыстов. Использование методологии многомассового моделирования в программных комплексах свидетельствует о высоком уровне владения современным инструментарием исследования.

В третьей главе подробно описана методика и представлены результаты масштабных экспериментальных исследований, целью которых была верификация разработанных моделей. Комплексный подход к проведению экспериментов с использованием высокоточного оборудования

(Racelogic Vbox, GPS, датчики угловых скоростей) на различных типах машин заслуживает высокой оценки.

Четвертая глава знакомит с разработанной параметризованной моделью «виртуальной лесосеки». Данный инструмент является мощным средством для проектных и исследовательских расчётов, позволяющим проводить виртуальные испытания в контролируемых и воспроизводимых условиях.

Пятая глава содержит, пожалуй, наиболее значимые с практической точки зрения результаты – разработанные автором законы управления движением для колёсных и гусеничных БПТМ. Предложенные алгоритмы отличаются новизной и ориентированы на компенсацию специфических возмущающих воздействий, характерных для процесса трелёвки.

Шестая и седьмая главы завершают исследование, демонстрируя применение разработанного инструментария для решения прикладных задач: определения рациональных параметров трансмиссий и проведения сравнительного технико-экономического анализа, который доказывает высокую эффективность предлагаемых решений.

Изложение материала последовательное, логичное, ведётся грамотным научным языком с использованием общепринятой терминологии. Каждая глава завершается краткими выводами, что облегчает восприятие и подчёркивает системность работы. Графический материал (рисунки, схемы, графики) отличается высоким качеством и информативной насыщенностью.

Замечания

1. В работе представлена и детально описана коллаборативная технология заготовки древесины с использованием БПТМ, декларируется повышение безопасности, энергоэффективности и экономической эффективности. Однако в тексте отсутствуют конкретные количественные сравнения (например, снижение себестоимости кубометра древесины, процент роста производительности, расчет снижения риска травматизма) с традиционными технологиями. Без таких расчетов практическая значимость и экономическая обоснованность предлагаемых решений носят декларативный характер.
2. Приведен обширный анализ сенсорного оборудования (лидары, радары, камеры) и даже методов его очистки. Однако отсутствует оценка надежности распознавания окружающей обстановки в сложнейших условиях лесосеки: при интенсивном запылении, в дождь и снегопад, при сложном освещении (солнечные блики, глубокие тени), в густом подлеске. Нет данных о вероятностях ложных срабатываний и пропусков препятствий, а также о том, как эти факторы учтены в алгоритмах принятия решений системой управления.
3. Предложенная параметризованная модель лесосеки, безусловно, полезна, но её соответствие реальным производственным условиям требует более глубокого обоснования. Не представлены данные о валидации этой модели на значительной выборке реальных лесосек с разнообразным

рельефом, типами грунтов и составом древостоя. Возникает вопрос: насколько репрезентативны выбранные для моделирования участки?

4. Выводы о преимуществах четырёхкатковой машины с коником по энергозатратам (13915,9 кДж) сделаны на основе моделирования в конкретных условиях. Требуется анализ чувствительности этих результатов к изменению ключевых параметров: длины пачки, влажности грунта, уклона трассы. Без этого обсуждение энергоэффективности представляется не полным и не даёт полной картины для выбора оптимальной конструкции.

5. В расчётах экономического эффекта не в полной мере учтены капитальные затраты на создание и поддержание инфраструктуры для работы беспилотного парка (сенсорные сети, системы связи, центры управления), а также потенциальные риски, связанные с кибербезопасностью и отказоустойчивостью сложных робототехнических систем. Это может привести к завышению ожидаемой экономической эффективности.

6. В работе представлена детализированная модель пачки хлыстов в виде системы шарнирно-сочлененных стержней (раздел 2.6.3), учитывающая переменную жесткость и массу по длине, а также контакт с опорной поверхностью через силу сопротивления волочению. Однако, несмотря на существенное углубление модели, в ней сохраняются принципиальные упрощения:

- Модель не учитывает значительные продольные (растягивающие/сжимающие) усилия, возникающие в пачке при разгоне, торможении и преодолении сопротивления волочению. Как справедливо отмечено в анализе предшествующих исследований (раздел 2.6.2, выводы), эти силы могут существенно влиять на динамику системы, особенно в нестационарных режимах.

- Не представлен алгоритм описания ударных нагрузок и нестационарных процессов, таких как резкое смещение или соударение хлыстов внутри пачки при движении по неровностям или выполнении маневров. Это ограничивает возможность оценки пиковых нагрузок на раму и технологическое оборудование БПТМ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 95 научных работ, в том числе 42 статьи в журналах из перечня ВАК, 18 статей в Scopus, 4 патента, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Публикации отражают основные научные результаты работы.

Соответствие содержания диссертации и реферата

Название диссертационной работы «Методы разработки беспилотных колесных и гусеничных трелёвочных машин» полностью соответствует её содержанию. Работа посвящена именно разработке и обоснованию комплекса методов – от технологических и математических до методов управления и экономической оценки.

Автореферат составлен в строгом соответствии с установленными требованиями. Он адекватно, полно и объективно отражает основное содержание диссертации. В автореферате чётко сформулированы:

- Актуальность, цель и задачи исследования.
- Положения, выносимые на защиту, которые полностью коррелируют с заявленной научной новизной.
- Основные научные результаты и выводы, сделанные в работе.
- Теоретическая и практическая значимость, а также сведения об апробации и внедрении.

Объём и структура автореферата позволяют составить полное и точное представление о проделанной работе, её методологической основе, полученных результатах и их ценности. Никаких существенных расхождений между содержанием диссертации и авторефератом не выявлено.

Соответствие содержания диссертационной работы паспорту специальности

Проведенный анализ содержания диссертационной работы Клубничкина В.Е. позволяет констатировать её полное и всестороннее соответствие требованиям паспортов специальностей 4.3.4 и 2.5.11. Соответствие определяется тем, что все положения, выносимые на защиту, и полученные научные результаты напрямую соотносятся с конкретными пунктами данных паспортов.

По специальности 4.3.4 «Технология, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины»:

- **Пункту 3** (*«Теория и методы воздействия техники и технологий на лесную среду в процессе... заготовки... древесного сырья»*) соответствуют **положения № 1, 4 и 5**. Разработанная коллаборативная технология, виртуальная лесосека и методы определения параметров направлены на минимизацию негативного воздействия на лесную среду (предотвращение выезда за пределы волока, учёт деградации грунта).
- **Пункту 5** (*«Компоновка, типы, параметры и режимы работы машин... производств»*) соответствуют **положения № 4 и 5**, в которых решаются задачи определения рациональных параметров, компоновочных решений и режимов работы БПТМ на этапе проектирования.
- **Пункту 6** (*«Автоматизация, роботизация, информатизация управления машинами и системами лесной промышленности»*) в высшей степени соответствует **положение № 1**, где представлена принципиально новая коллаборативная технология, основанная на роботизации и дистанционном управлении трелёвочными машинами.

По специальности 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы»:

- **Пункту 1** (*«Теория рабочих процессов... взаимодействующих с опорной поверхностью... и с рабочими средами...»*) в полной мере соответствует **положение № 2** диссертации, в котором разработаны новые математические модели движения БПТМ, описывающие рабочие процессы

взаимодействия двигателя с опорной поверхностью (грунтом), а технологического оборудования (пачкового захвата, коника) – с рабочей средой (пачкой хлыстов) с учётом её колебаний.

- **Пункту 2** (*«Методы расчета и проектирования... направленные на создание новых... средств... обладающих высоким качеством... экономичностью... энергоэффективностью и безопасностью»*) соответствует **положение № 5**, где разработаны новые методы определения рациональных характеристик трансмиссии и оборудования, направленные на создание энергоэффективных и безопасных БПТМ.

- **Пункту 5** (*«Математическое моделирование рабочих процессов... при взаимодействии с опорной поверхностью и с рабочими средами»*) соответствует **положение № 4**, в котором создана параметризованная модель «виртуальной лесосеки» для математического моделирования рабочих процессов БПТМ в различных дорожно-грунтовых условиях.

- **Пункту 6** (*«Оптимизация конструкций и синтез законов управления движением... направленные на улучшение... производительности, экологичности... обеспечение энергоэффективности и безопасности»*) напрямую соответствует **положение № 3**, где произведён синтез новых законов управления движением БПТМ, обеспечивающих энергоэффективность, безопасность и экологичность.

Таким образом, содержание диссертации, её научные результаты и положения, выносимые на защиту, органично интегрированы в проблемное поле обеих заявленных научных специальностей и в полной мере соответствуют установленным ими критериям.

Общее заключение

Диссертационная работа Клубничкина Владислава Евгеньевича является самостоятельным, завершённым и целостным научным исследованием, в котором решена крупная научная проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение. Автором разработан и научно обоснован комплекс методов, позволяющий перейти к созданию беспилотных трелёвочных машин для лесного комплекса.

Личный вклад автора заключается в непосредственной разработке всех представленных моделей, алгоритмов, методик и технологий, а также в проведении масштабного теоретического и экспериментального исследований.

Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, отличается глубиной проработки, системностью подхода и убедительностью доказательств. Изложение материала ясное, логичное, с использованием корректной научной терминологии. Выводы и рекомендации обоснованы и достоверны.

Отмеченные в ходе ознакомления с работой отдельные замечания (например, требующие более детального анализа некоторых параметров) носят частный характер и не влияют на оценку работы в целом.

На основании сказанного выше считаю, что диссертационная работа «Методы разработки беспилотных колесных и гусеничных трелёвочных машин», а также автореферат данной работы, соответствуют паспорту специальностей 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины» и 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы» и требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор Клубничкин Владислав Евгеньевич, заслуживает присуждения ему учёной степени **доктора технических наук** по специальностям 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины» и 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы».

Официальный оппонент

доктор технических наук
(05.22.10 - Эксплуатация
автомобильного транспорта),
доцент



Молев Юрий Игоревич

12.11.2025г.

Профессор кафедры «Строительные и дорожные машины» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

ул. Семашко 7, г. Нижний Новгород, 603005

Тел. 8 (831) 436-01-59, e-mail: moleff@yandex.ru

Подпись доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Строительные и дорожные машины» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Учёный секретарь Учёного Совета НГТУ

И.Н. Мерзляков

