

ОТЗЫВ

официального оппонента **Григорьева Игоря Владиславовича** доктора технических наук, профессора, профессора кафедры «Технология и оборудования лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», на диссертационную работу **Клубничкина Владислава Евгеньевича** на тему «Методы разработки беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин», представленную 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 исследования. Развитие лесопромышленного комплекса России, в соответствии со Стратегией до 2030 года, требует освоения новых лесных массивов, зачастую характеризующихся слабонесущими грунтами и сложными природными условиями. Одновременно с этим общемировые тенденции направлены на внедрение интеллектуальных транспортных систем и автономных средств, что позволяет повысить производительность, безопасность и экологичность производства. В этом контексте разработка научно обоснованных методов создания беспилотных трелевочных машин (БПТМ) является исключительно актуальной и своевременной научно-технической задачей. Представленная диссертационная работа направлена на решение данной проблемы, что и определяет ее высокую актуальность.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

На защиту вынесен комплекс научных положений, составляющих основу работы:

1. **Коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами.** Положение обосновано глубоким анализом существующих технологических процессов и предложением новой организации труда на лесосеке, предусматривающей зонирование ответственности и комбинирование автономного и дистанционно управляемого режимов работы БПТМ. Это позволяет исключить простои, повысить безопасность и эффективность.

2. **Математические модели движения БПТМ с полупогруженной пачкой.** Обоснованность положения подтверждается применением фундаментальных методов динамики систем твердых тел, учетом взаимодействия движителей с опорной поверхностью и детализированным моделированием пачки хлыстов как системы шарнирно-соединенных стержней. Достоверность моделей верифицирована экспериментально.

3. **Законы управления движением БПТМ.** Положение обосновано разработкой комбинированных и адаптивных систем управления (включая ПИД-регуляторы и управление по отклонению и возмущению), учитывающих специфику динамики машины с грузом и обеспечивающих движение по заданной траектории с высокой точностью и энергоэффективностью.

4. **Метод определения рациональных технических характеристик трансмиссии и оборудования БПТМ с использованием виртуальной лесосеки.** Положение обосновано созданием параметризованной модели лесосеки, учитывающей геометрические и физико-механические характеристики дорожно-грунтовых условий, и проведением комплекса вычислительных экспериментов для оптимизации конструктивных параметров на этапе проектирования.

5. **Результаты технико-экономического обоснования коллаборативной технологии.** Положение обосновано применением общепринятых методик сравнительного анализа, которые продемонстрировали значительное повышение производительности (до 20%), экономию средств на оплату труда оператора, топливо и энергоносители, а также снижение экологической нагрузки.

Таким образом, все представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации являются обоснованными, логически вытекают из проведенных исследований и подтверждены расчетами, моделированием и экспериментальными данными.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- Использованием апробированных методов имитационного моделирования динамики сложных механических систем.

- Проведением натурных экспериментов на базе серийных трелевочных тракторов с применением современных средств измерений (Racelogic Vbox, GPS-приемники, индуктивные датчики измерительного комплекса ZetLab).
- Сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными, показавшим приемлемую погрешность (отклонение траекторий не более 16%, кинематических и энергетических показателей – не более 13%).
- Внедрением результатов работы на предприятиях лесного и транспортного машиностроения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые разработана коллаборативная технология заготовки древесины, интегрирующая автономные и дистанционно управляемые БПТМ в единый производственный цикл.
- Впервые созданы комплексные математические модели динамики колесных и гусеничных БПТМ, учитывающие колебания полупогруженной пачки хлыстов.
- Впервые разработаны специализированные законы управления движением БПТМ, обеспечивающие высокую точность следования по траектории, энергоэффективность и исключение выезда за пределы волока.
- Предложена новая параметризованная модель «виртуальной лесосеки» как инструмент для проектно-конструкторских работ.
- Впервые предложен метод определения рациональных параметров трансмиссии и технологического оборудования БПТМ на этапе проектирования на основе имитационного моделирования на виртуальной лесосеке.

Практическая ценность научных положений, выводов и рекомендаций

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработанные математические модели и программные комплексы позволяют на этапе проектирования прогнозировать подвижность, энергоэффективность и нагруженность элементов БПТМ.
2. Предложенные законы управления могут быть использованы для создания систем автоматического и дистанционного управления перспективной лесозаготовительной техникой.
3. Коллаборативная технология и технико-экономическое обоснование служат базой для модернизации лесозаготовительных процессов на предприятиях.

4. Результаты работы внедрены в ПАО «КАМАЗ», АО «Курганмашзавод»-«Рубцовск», ООО Завод «Алтайлесмаш», ООО «ЛЕСТЕХ-ФИНАНС», что подтверждает их практическую значимость.

Личный вклад соискателя

Личный вклад Клубничкина Владислава Евгеньевича является определяющим в получении основных результатов диссертации. Им лично выполнены: анализ состояния проблемы, разработка коллаборативной технологии заготовки древесины, создание математических моделей и законов управления, планирование и проведение экспериментальных исследований, обработка их результатов, разработка виртуальной лесосеки, проведение технико-экономического анализа. Анализ публикаций и апробации подтверждает, что основные научные результаты получены лично соискателем.

Апробация результатов исследования

Результаты работы прошли широкую апробацию на международных и всероссийских конференциях и форумах, среди которых: I-ый Европейский лесопромышленный форум 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; Международный молодежный симпозиум «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 Международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки». Нижний Новгород, 2017; 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS. Budapest (Hungary), 2017; Ежегодные научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Мытищи, Московская обл. 2017-2025; 102-ая Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы помощи водителю: разработка, исследование, сертификация». Нижний Новгород, 2018; Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2018-2020). Севастополь, 2018-2020; Научно-технический семинар «Подвижность транспортно-технологических машин». Нижний Новгород, 2018-2020; Всероссийская научная

конференция, посвященная 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова «Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса». Воронеж 2020; Всероссийская научно-практическая конференция «Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития». Воронеж, 2022; Всероссийская научно-практическая конференция «Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития», Воронеж, 2023; XX и XXI Международная научно-техническая конференция «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.

Основные положения диссертации опубликованы в 95 научных работах, включая 42 статьи в изданиях из перечня ВАК, 18 статей, индексируемых в международной базе научных изданий SCOPUS, а также патенты РФ на изобретения, полезные модели и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в диссертационной работе используются в учебном процессе на кафедре «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса» Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана при чтении лекций, проведении семинаров и лабораторных работ по направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» в рамках дисциплин «Проектирование машин и оборудования лесного комплекса», «Проектирование внедорожных машин», «Конструирование и расчет машин и оборудования лесного комплекса», а также при выполнении курсового проектирования, НИРС и выпускных квалификационных работ.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов, заключения, списка литературы (229 наименований) и приложений. Работа изложена на 326 страницах, содержит 227 рисунков и 30 таблиц.

Введение выполнено на высоком уровне: четко обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи, положения научной новизны, практическая значимость и апробация работы. Квалификационные признаки диссертации представлены в полном объеме.

Первая глава представляет собой комплексный и систематизированный анализ современного состояния проблемы. Соискатель не только провел глубокий обзор отечественных и зарубежных исследований в области трелевки леса, теории движения машин и робототехники, но и на его основе убедительно аргументировал необходимость разработки новых методов создания БПТМ. На основе анализа сформирован полный цикл работы БПТМ и предложения по их техническому облику, что стало прочным фундаментом для дальнейших исследований.

Вторая глава посвящена теоретическим основам работы. Разработанный комплекс имитационных математических моделей движения колесных и гусеничных БПТМ с полупогруженной пачкой является одним из ключевых результатов работы. Методология построения моделей, основанная на динамике систем твердых тел с использованием современных программных комплексов, выбрана корректно. Детализированное моделирование пачки хлыстов в виде системы шарнирно-соединенных стержней с различными физико-механическими характеристиками, а также учет контактного взаимодействия с опорной поверхностью, заслуживает высокой оценки.

Третья глава содержит подробное описание экспериментальных исследований. Методика проведения экспериментов, применяемое оборудование (системы Racelogic Vbox, GPS-датчики, индуктивные датчики) и объекты испытаний описаны с достаточной для воспроизводимости полнотой. Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования подтвердило адекватность разработанных моделей с приемлемой для задач прогнозирования погрешностью (не более 16% по траектории), что является убедительным доказательством достоверности полученных результатов.

Четвертая глава демонстрирует переход от теоретических разработок к практическому применению. Разработка параметризованной «виртуальной лесосеки» является мощным инструментом для проектирования и испытаний. Учет широкого спектра геометрических и физико-механических характеристик дорожно-грунтовых условий, а также различных участков траектории (повороты, подъемы, микропрофиль) позволяет всесторонне оценивать показатели БПТМ на этапе проектирования.

Пятая глава является центральной с точки зрения новизны и практической ценности. Разработанные законы управления движением для шарнирно-сочлененных колесных и гусеничных БПТМ отличаются глубиной проработки. Комбинированный подход, сочетающий управление по отклонению, возмущению и программное

управление, а также алгоритмы следования по записи, позволяет эффективно решать задачи точного позиционирования и компенсации внешних воздействий.

Шестая глава логично продолжает предыдущую, демонстрируя применение разработанных законов управления для определения рациональных конструктивных параметров трансмиссии. Выводы о преимуществах двухпоточных дифференциальных механизмов с гидрообъемной передачей и гибридных систем являются практически значимыми и могут быть использованы конструкторскими бюро.

Седьмая глава содержит комплексное технико-экономическое обоснование. Использование методов имитационного моделирования и сравнительного анализа позволило количественно оценить все заявленные преимущества коллаборативной технологии: рост производительности, экономию на оплате труда, ГСМ и энергоносителях, а также экологический эффект.

Структура диссертации логична и отражает последовательность решения поставленных задач. Содержание работы соответствует паспорту научных специальностей 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).

Замечания по диссертации

Несмотря на высокий уровень выполненной работы, можно указать на следующие замечания, которые не снижают общей положительной оценки:

1. Законы управления представлены в виде структурных схем и аналитических выражений, а их эффективность подтверждена имитационным моделированием. Однако не описано, проводились ли натурные эксперименты по апробации этих законов на реальных машинах, оснащенных системой автоматического управления, или верификация ограничилась сравнением с моделью.

2. При создании математических моделей пачки хлыстов приняты допущения о постоянстве плотности и модуля упругости древесины. Не проведен анализ чувствительности моделей к изменению этих параметров, например, для древесины разной породы (сосна, ель, береза) или влажности, что может влиять на динамику пачки.

3. В работе указано, что физико-механические характеристики ДГУ «разыгрываются при проходе машины». Требуется пояснения алгоритм этого «разыгрывания».

Как именно моделируется деградация грунта (ухудшение несущей способности, увеличение колен) при многократном проходе БПТМ по одному и тому же волоку?

4. В работе параллельно разработаны решения для колесных и гусеничных БПТМ. Однако в выводах отсутствует их сравнительный анализ по ключевым показателям (энергоэффективность, производительность, воздействие на грунт, стоимость) для одних и тех же условий виртуальной лесосеки, что могло бы дать ценные рекомендации для выбора типа движителя.

5. Разработанная виртуальная лесосека с параметризованными характеристиками ДГУ является ключевым инструментом для выводов о рациональных конструктивных параметрах. Однако, исходные данные для этой модели, в частности, зависимости коэффициентов f и μ от числа проходов (Таблица 25), вызывают вопросы с точки зрения их репрезентативности и валидации.

- Не приведены ссылки на конкретные экспериментальные исследования или физические модели, на основе которых были установлены точные численные значения деградации f и μ в Таблице 25. Не показано, являются ли эти зависимости универсальными или привязаны только к одному типу грунта.

- В модели не учтено поперечное смещение машины при повторных проходах, приводящее к формированию двух независимых колеи с разными свойствами. Использование осредненной полосы движения может исказить реальную картину изменения сопротивления.

- Проводилась ли чувствительность итоговых энергозатрат (Таблица 28) к вариациям этих ключевых параметров f и μ ? Насколько изменение, например, коэффициента μ на $\pm 0,1$ повлияет на вывод о рациональности той или иной схемы трансмиссии?

6. Предложенные перспективные схемы трансмиссии (гибридный МПП, индивидуальный привод) обоснованы с точки зрения эффективности, однако их практическая реализуемость, надежность и стоимость проанализированы поверхностно.

- Проводилась ли в рамках работы хотя бы упрощенная оценка массы, габаритов, стоимости и надежности предложенных перспективных схем трансмиссии (например, гибридного МПП) по сравнению с традиционными решениями? Не приведет ли усложнение трансмиссии к снижению общей надежности машины в тяжелых лесозаготовительных условиях?

- Представленные графики моментов и скоростей (Рис. 6.36 – 6.44) не сопровождаются выводом о воздействии этих динамических нагрузок на долговечность и прочность конкретных элементов трансмиссии (бортовых редукторов, валов) в рамках выбранных рациональных схем.

7. В технико-экономическом исследовании приведены впечатляющие показатели: экономия на зарплате ~3.1 млн руб./год, повышение производительности на 20%, снижение выбросов CO₂. Однако первоначальные затраты на переоборудование оцениваются в 35-50% от стоимости машины.

- В расчете экономического эффекта учтена экономия на кабине, но не учтены сопутствующие возрастающие затраты на разработку и поддержку ПО, защищенные каналы связи, резервирование систем и дорогостоящий ремонт сенсорного оборудования.

- Экономическая эффективность показана для условного случая, без расчета точки окупаемости для малых предприятий с парком в 2-3 машины, где высокие постоянные затраты на ПО и инфраструктуру могут сделать проект нерентабельным.

- Как в коллаборативной технологии предлагается решать задачу обеспечения безопасности в нештатных ситуациях, когда требуется немедленное реагирование (например, падение дерева на пути машины, появление человека или животного в зоне работы), особенно с учетом задержек в системе связи при дистанционном управлении?

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления от представленной работы и могут быть пояснены соискателем в процессе защиты.

Заключение, соответствие диссертации и автореферата требованиям Положения о присуждении ученых степеней

Диссертация Клубничкина Владислава Евгеньевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена крупная научная проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение. Содержащиеся в диссертации разработки вносят значительный вклад в теорию и практику создания беспилотной лесозаготовительной техники.

Автореферат и опубликованные работы адекватно и полностью отражают содержание, основные положения и научные результаты диссертации.

Недостатки, отмеченные в отзыве, не снижают уровня теоретической и практической значимости работы. Диссертация соответствует критериям, установленным

«Положением о порядке присуждения учёных степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Клубничкин Владислав Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по научным 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)».

18.11.2025 г.

Официальный оппонент - Григорьев Игорь Владиславович

Доктор технических наук специальность 05.21.01 - Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства (технические науки), профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса», ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»,

Тел.: +7 (4112) 507-971, e-mail: silver73@inbox.ru

Адрес: 677007, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, шоссе Сергеляхское, 3 км., дом 3.

