

На правах рукописи

Клубничкин Владислав Евгеньевич

**МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ БЕСПИЛОТНЫХ КОЛЕСНЫХ И
ГУСЕНИЧНЫХ ТРЕЛЕВОЧНЫХ МАШИН**

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

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и
комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2025

Содержание

	Стр.
Введение.....	7
Глава 1. Анализ состояния вопроса. Постановка задач исследования	20
1.1. Анализ условий эксплуатации и технологии применения трелевочных машин.....	21
1.1.1. Факторы природного и производственного характера.....	23
1.1.2. Классификация рубок и их влияние на технологию.....	25
1.1.3. Классификация колесных и гусеничных лесозаготовительных машин.....	26
1.1.4. Технология лесозаготовок с использованием трелевочных машин..	32
1.1.5. Применение трелевочных машин при хлыстовой технологии лесозаготовок.....	36
1.1.6. Основные конструктивные особенности, определяющие функциональные свойства и технические требования трелевочных машин в беспилотном исполнении.....	38
1.1.7. Коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами.....	79
1.1.8. Формирование облика (схемных решений) колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин для хлыстовой и сортиментной технологии лесозаготовок.....	83
1.2. Требования к основным характеристикам и устройству трелёвочного оборудования с пачковым захватом.....	114
1.3. Требования к трансмиссиям трелевочных машин и системам управления движением.....	118
1.4. Анализ математических моделей движения колесных и гусеничных машин.....	122
1.4.1. Описание математической модели взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием.....	122

1.4.2 Описание математических моделей взаимодействия колесного движителя с опорным основанием.....	125
1.5 Задачи исследования.....	128
Глава 2. Разработка математических моделей движения колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин.....	130
2.1 Математическое описание уравнений динамики в программных комплексах моделирования.....	131
2.2 Математическая модель взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием.....	138
2.3 Математическая модель взаимодействия катка с гусеничными траками.....	144
2.4 Математическая модель динамики беспилотных трелевочных машин для хлыстовой заготовки как системы твердых тел.....	150
2.4.1 Математическая модель динамики гусеничной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом.....	150
2.4.2 Математическая модель динамики гусеничной беспилотной трелевочной машины с манипулятором и самозажимным коником.....	155
2.4.3 Математическая модель динамики колесной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом.....	159
2.5 Математическая модель динамики беспилотных трелевочных машин для сортиментной заготовки как системы твердых тел.....	162
2.5.1 Математическая модель динамики гусеничной беспилотной погрузочно-транспортной машины с полуприцепом.....	162
2.5.2 Математическая модель динамики колесной беспилотной погрузочно-транспортной машины.....	164
2.6 Модель взаимодействия пачки хлыстов с опорной поверхностью и технологическим оборудованием машины.....	168
2.6.1 Обзор и анализ исследований модели хлыста и пачки хлыстов...	168
2.6.2 Исследования транспортных свойств пачек хлыстов.....	170

2.6.3. Математическая модель взаимодействия пачки хлыстов с опорной поверхностью и пачковым захватом.....	194
2.7. Выводы по Главе 2.....	199
Глава 3. Экспериментальные исследования.....	201
3.1. Цель экспериментальных исследований.....	201
3.2. Объект испытаний и аппаратурно-измерительный комплекс.....	201
3.3. Экспериментальные исследования движения колесных и гусеничных трелевочных машин. Верификация математических моделей	205
3.4. Выводы по Главе 3.....	217
Глава 4. Разработка виртуальной лесосеки для моделирования трелевочных операций с параметризированными характеристиками дорожно-грунтовых условий.....	218
4.1. Общие сведения о разработке лесосек.....	218
4.2. Характеристики дорожно-грунтовых условий виртуальной лесосеки.....	219
4.3. Участки виртуальной лесосеки для оценки профильной проходимости.....	225
4.4. Выводы по Главе 4.....	229
Глава 5. Разработка законов управления движением беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин.....	230
5.1. Закон автоматизированного движения трелевочной машины по заданной траектории.....	230
5.2. Закон управления движением сочлененной колесной трелевочной машины по заданной траектории.....	233
5.3. Закон управления движением гусеничной трелевочной машины по заданной траектории.....	240
5.4. Выводы по Главе 5.....	244
Глава 6. Теоретические исследования процесса трелевки колесными и гусеничными беспилотными машинами.....	246

6.1. Программа виртуальных испытаний для комплексного определения рациональных конструктивных параметров беспилотных колесных и гусеничных машин в процессе трелевки.....	246
6.2. Определение показателей профильной проходимости беспилотных трелевочных машин.....	246
6.2.1. Моделирование движения гусеничной беспилотной трелевочной машины при преодолении подъемов и спусков.....	247
6.2.2. Моделирование движения гусеничной беспилотной трелевочной машины по косогору.....	253
6.2.3. Оценка предельной высоты преодолеваемого единичного препятствия в виде поваленного дерева.....	255
6.2.4. Оценка предельной высоты преодолеваемого единичного препятствия в виде пня.....	258
6.2.5. Оценка предельной высоты преодолеваемого уступа.....	261
6.2.6. Оценка предельной высоты преодолеваемого контрэскарпа.....	265
6.3. Исследование движения колесных и гусеничных машин в процессе трелевки по маршрутам трелевочного волока виртуальной лесосеки и при выполнении маневров.....	268
6.3.1. Моделирование движения гусеничных беспилотных трелевочных машин.....	269
6.3.2. Моделирование движения колесной беспилотной трелевочной машины.....	279
6.3.3. Техническое оснащение беспилотных машин для трелевки заранее подготовленных пачек деревьев.....	282
6.4. Выводы по Главе 6.....	286
Глава 7. Техничко-экономического исследование коллаборативной технологии заготовки древесины.....	288
7.1. Расчет экономического эффекта от внедрения беспилотных технологий.....	288
7.2. Выводы по Главе 7.....	291

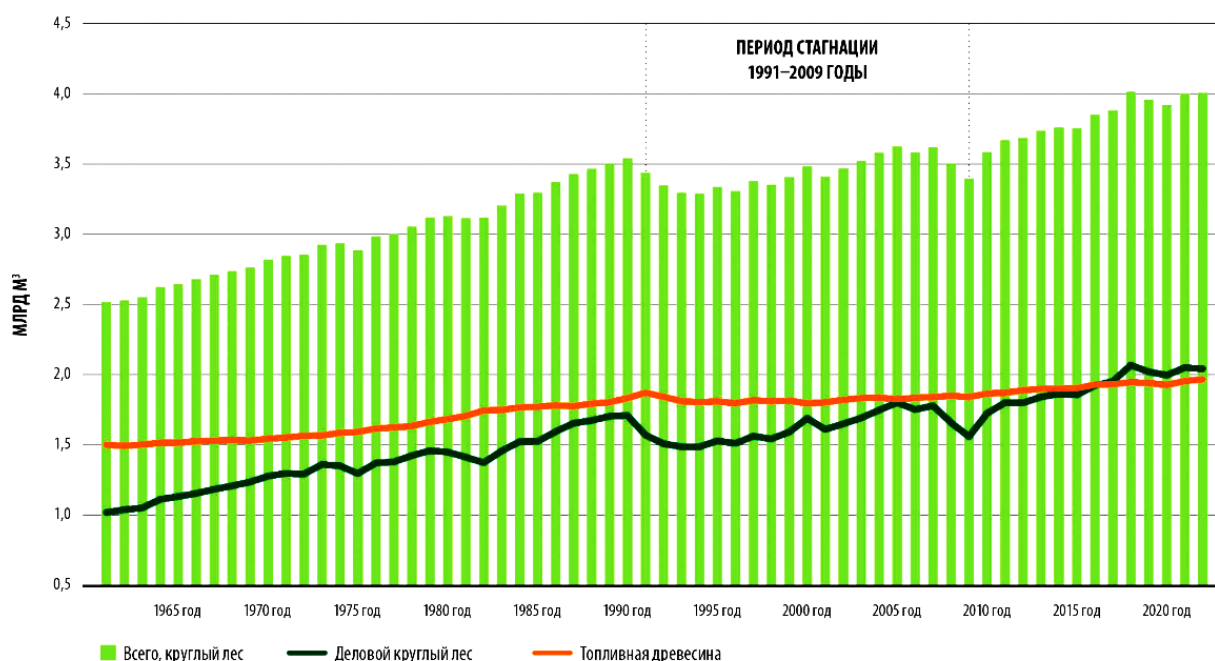
Заключение и общие выводы по работе.....	293
Список сокращений и условных обозначений.....	296
Список литературы.....	297
Приложение.....	320

Введение

Мировые объемы лесозаготовок стабильно растут, но темпы роста замедляются из-за ужесточения экологических норм и перехода к устойчивому лесопользованию. В 2020 году общий объем заготовленной древесины в мире составил около 4 млрд м³.

В Северной Америке и ряде стран Европы объемы лесозаготовок стабилизировались из-за перехода к устойчивому лесопользованию и из-за сокращения доступных лесных ресурсов. В Азии и Южной Америке наблюдается рост объемов лесозаготовок, особенно в странах с развивающейся экономикой (например, Бразилия, Индонезия, Китай). В Африке идет увеличение объемов лесозаготовок, но с высокими рисками нелегальных вырубок.

На рисунке ниже представлен график, показывающий рост мирового производства круглого леса, включая деловой круглый лес и древесное топливо в период 1961–2022 годы.



Рост мирового производства круглого леса, включая деловой круглый лес и древесное топливо в период 1961–2022 годы [213]

Ожидается, что к 2030 году объемы лесозаготовки достигнут 4,3–4,5 млрд м³ [214, 215, 216]. Рост будет происходить преимущественно в развивающихся странах, в то время как в развитых странах объемы могут стабилизироваться.

Из рисунка ниже видно, что на сегодняшний день более 63% древесины во всем мире заготавливается с помощью лесозаготовительных машин, предназначенных как для сортиментной, так и для хлыстовой заготовки древесины. Ниже приведено соотношение хлыстовой и сортиментной заготовки при машинной лесозаготовке.



Заготовка древесины

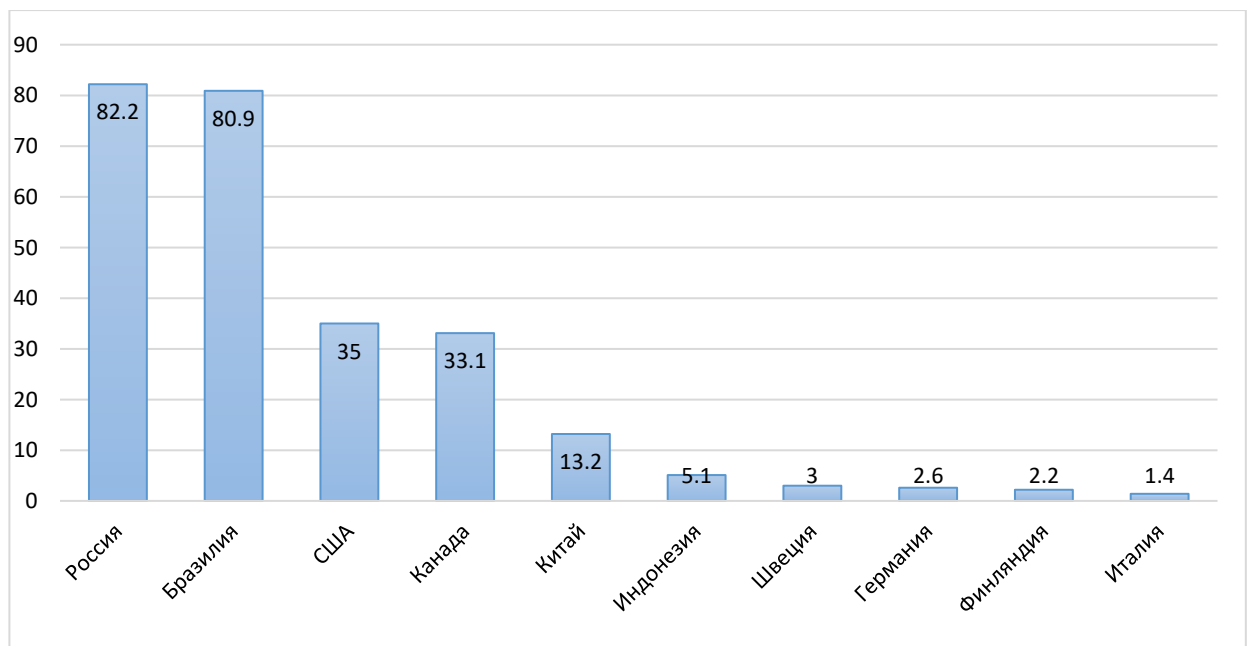
В настоящее время существует ряд проблем безопасности, связанных с традиционными методами лесозаготовки. Основные из них это: снижение риска травматизма и гибели операторов; минимизация человеческого фактора; защита от неблагоприятных условий труда; уменьшение воздействия вредных факторов; минимизация воздействия на окружающую среду (экологическая безопасность); улучшение безопасности в труднодоступных местах (сложный рельеф, высок риск оползней, обвалов и т.д.); снижение риска конфликтов с дикой природой.

Внедрение беспилотных трелевочных машин (БПТМ) позволяет решить представленные выше проблемы безопасности. Также с внедрением БПТМ, помимо безопасности, могут быть решены проблемы, связанные с увеличением производительности, снижением ряда затрат, нехваткой квалифицированных операторов, улучшением контроля и мониторинга.



Проблемы безопасности при лесозаготовках

В России огромные возобновляемые запасы лесных ресурсов, они позволяют без экологического ущерба ежегодно заготавливать 568 млн. м³ древесины (в настоящее время всего заготавливается 185 млн м³). На рисунке ниже представлены запасы древесных лесных ресурсов России и стран мира, млрд. м³



Запасы древесных лесных ресурсов России и стран мира, млрд. м³

Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [180] предусмотрено увеличение объемов заготовки древесины до 290 млн м³ в год, включая освоение новых лесных массивов на слабонесущих грунтах.

Утверждённая «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» и приоритетные направления научно-технологического развития РФ, включая интеллектуальные транспортные системы и автономные транспортные средства, подчеркивают необходимость внедрения инновационных технологий для повышения производительности труда, экологической устойчивости и безопасности лесозаготовок. Традиционные методы лесозаготовки сопряжены с высоким риском травматизма, воздействием вредных факторов и неблагоприятных условий труда, что делает внедрение беспилотных технологий особенно актуальным.

Развитие лесного комплекса, описанное в рамках стратегии, приведет к значительному увеличению ежегодных инвестиций в оборудование (оценочно с 28 до 58 млрд. рублей к 2030 году в постоянных ценах). В связи с этим и с текущей мировой обстановкой тематика импортозамещения оборудования для предприятий лесного комплекса становится особенно актуальной.

В то время как роботизированные системы активно применяются в сельском хозяйстве и горнодобывающей промышленности, в лесной отрасли они пока не получили широкого распространения. Данная работа направлена на устранение этого разрыва, предлагая научно обоснованные решения для интеграции беспилотных технологий в лесозаготовительные процессы, что способствует эффективному лесопользованию и переходу к интенсивным методам лесозаготовок.

Во всем мире внедряются коллаборативные технологии, направленные на повышение безопасности труда, энергоэффективности при выполнении операций и экономической эффективности работ. Одним из перспективных и уже возможных к реализации направлений применения беспилотных машин лесного комплекса является организация трелевки древесины по заданным маршрутам при коллаборативной технологии заготовки древесины. С развитием робототехники беспилотные автономные и дистанционно управляемые машины будут широко использоваться для решения различных задач лесного комплекса, где работа человека трудна и небезопасна [89, 93, 187, 188, 190].

Актуальным является проведение научных исследований, направленных на повышение энергоэффективности путем применения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин (БПТМ), которая достигается определением рационального маршрута движения БПТМ по трелевочному волоку и выбором режимов работы моторно-трансмиссионной установки.

Прокладка маршрута передвижения БПТМ по волоку производится на основании данных о месте лесозаготовки в виде цифровой карты с характеристиками дорожно-грунтовых условий (ДГУ), плотности древостоя, уклона местности, расположения пачки деревьев (хлыстов), предназначенного для трелевки, сопротивления движению и сцепных свойств опорной поверхности. Энергоэффективность движения по маршруту определяется выбором траектории, скорости движения и режимов работы моторно-трансмиссионной установки.

При коллаборативной технологии заготовки древесины путем применения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин практически исключаются простои, связанные с перерывами на физиологические потребности оператора трелевочной машины. Исключается необходимость оплаты труда оператора трелевочной машины, повышается скорость движения машины в порожнем состоянии. Повышается безопасность труда. В целом, повышается коэффициент производительности труда и снижается себестоимость.

Скорость движения трелевочных машин зависит от характеристик системы, включающей двигатель, трансмиссию, ходовую часть и внешние условия. При заданных параметрах двигателя ключевым фактором, определяющим скорость машины, становятся параметры трансмиссии, которая служит для согласования характеристик двигателя с внешними условиями. Именно трансмиссия играет решающую роль в эффективном использовании мощности силового агрегата.

Теоретические основы и методы расчета тяговых машин базируются на трудах ведущих отечественных и зарубежных специалистов в сфере автомобилестроения и тракторостроения, включая работы академика Е.А. Чудакова, профессоров Е.А. Львова, М.К. Кристи, В.Н. Болтинского, М.Г. Беккера и других исследователей [29, 34, 116, 130, 181].

Практический опыт, полученный в ходе эксплуатации техники на лесозаготовках, лег в основу разработки теоретических принципов конструирования. Существенный вклад в изучение и создание колесных и гусеничных лесозаготовительных машин (ЛМ), совершенствования процесса трелевки древесины, оптимизации технологических процессов лесосечных работ внесли разработки отечественных ученых: Александрова В.А., Андреева В.Н., Анисимова Г.М., Бартенева И.М., Бита Ю.А., Бурмистровой О.Н., Воскобойникова И.В., Виногорова Г.К., Галактионова О.Н., Гобермана Л.А., Григорьева И.В., Добрецова Р.Ю., Егорова Л.И., Ерхова А.В., Жукова А.В., Зайчика М.И., Иванова В.А., Капранова И.В., Карпачева С.П., Клубничкина Е.Е., Котикова В.М., Кочнева А.М., Куликова М.И., Макарова, Ф.Н., Макуева В.А., Матвейко А.П., Махова Г.А., Мехренцева А.В., Муравьева А.В., Орлова С.Ф., Пяткина В.И., Редькина А.К., Сюнева В.С., Хахиной А.М., Хитрова Е.Г., Цофина З.С., Шапиро В.Я., Шегельмана И.Р., Шелгунова Ю.В., Ширнина Ю.А., Шоля Н.Р., Эмайкина Л.М. и др.

Условия эксплуатации трелевочных машин в лесозаготовительной отрасли предъявляют особые требования к их конструктивным узлам и агрегатам.

Вопросами взаимодействия колесных и гусеничных машин с опорными поверхностями в сельском хозяйстве, транспортном комплексе, военном деле и дорожном строительстве занимались ученые: Агейкин Я.С., Антонов Д.А., Бабков В.Ф., Баженов Е.Е., Бекетов С.А., Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Бируля А.К., Вахидов У.Ш., Водяник И.И., Вольская Н.С., Вольский С.Г., Горелов В.А., Гуськов В.В., Дьяков А.С., Евсеев К.Б., Забавников Н.А., Кацыгин В.В., Красеньков В.И., Косицын Б.Б., Котиев Г.О., Ксенович И.П., Ларин В.В., Летошнев М.Н., Ляско М.И., Макаров В.С., Молев Ю.И., Наказной О.А., Опейко Ф.А., Платонов В.Ф., Смирнов Г.А., Стадухин А.А., Фаробин Я.Е., Харитонов С.А., Чудаков Е.А., Шарипов В.М., Шуклин С.А., Шухман С.Б. и др. Также значительный вклад внесли зарубежные исследователи Адамс Д., Беккер М.Г., Ванцевич В., Вильям Л., Вонг Дж., Нордфьел Т., Риис А., Рингдал О., Санду К., Ханамото Б., Элс Ш., Янг Р.Н. и др.

Совершенствование технического уровня и создание новых высокоэффективных беспилотных трелевочных машин требуют проведения

фундаментальных исследований с использованием математического моделирования и современных численных методов.

В России разработкой роботизированных транспортных средств занимаются множество организаций, включая МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, АО «НПК «Уралвагонзавод», ОАО «ВНИИтрансмаш», Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, РТУ МИРЭА, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», ВолгГТУ, АО «ЦНИИАГ», ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, АО «ИРЗ», ВА БТВ, ПАО «КАМАЗ», ОАО «766 УПТК», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, АО Концерн «Калашников», ООО СМП «Роботикс», ООО «КБ Аврора» и другие.

Значительный вклад в эту сферу внесли такие ученые, как В.Н. Наумов, В.В. Беляков, А.Л. Кемурджиан, Ю.Л. Рождественский, Н.А. Забавников, В.В. Серебряный, А.Ф. Батанов, А.С. Горобцов, И.А. Каляев, С.Г. Капустян, В.Х. Пшихопов, И.Б. Шеремет, И.В. Рубцов, Н.А. Рудианов, В.Б. Кудряшов и другие.

За границей аналогичные разработки ведутся такими компаниями и организациями, как Mira Autonomous Control Equipment, Development and Engineering Center, Boston Dynamics, Oto Melara, Lockheed Martin, Google, Selex ES, Armament Research, Ruag Defence, DARPA, Torc Robotics, Kairos Autonomi, G-Nius, Oshkosh Defense и другими.

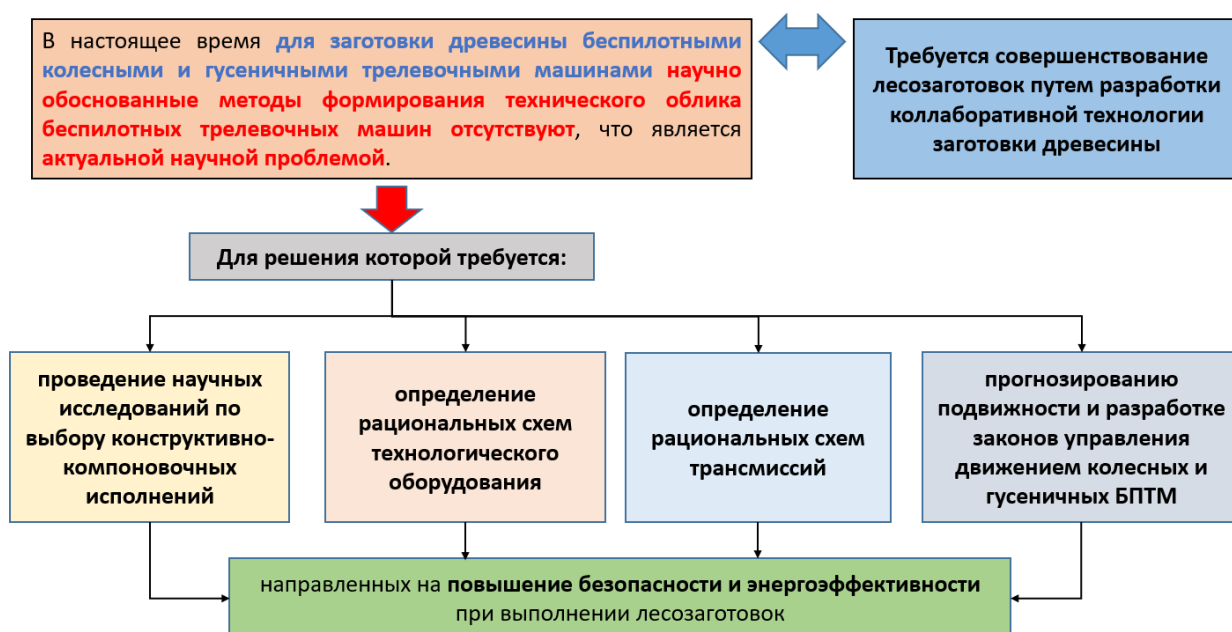
В свою очередь практически отсутствуют работы посвященные беспилотным трелевочным машинам лесного комплекса и у нас, и за рубежом. Данным вопросом занимаются небольшие группы ученых, среди которых Thomas Hellström, Ola Ringdahl и Ola Lindroos.

Очевидно, что отсутствие оператора на борту беспилотной трелевочной машины позволит существенно повысить ее подвижность по сравнению с машинами классической компоновки из-за отсутствия психофизиологических ограничений, связанных с нахождением человека на борту [107]:

- виброударные нагрузки;
- скорость реакции и воздействие на органы управления;
- усталость (включая скорость восприятия зрительной информации);
- тяжелые условия работы.

Таким образом, потенциальные характеристики подвижности БПТМ существенно выше машин под управлением операторов, поскольку нет ограничений, накладываемых психофизиологическими возможностями

На сегодняшний день отсутствуют научно обоснованные методы формирования технического облика беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин для лесозаготовок, что представляет собой важную научную проблему. Ее решение предполагает проведение научных исследований, направленных на выбор оптимальных конструктивно-компоновочных решений, определение эффективных схем технологического оборудования и трансмиссий, оценку подвижности, а также разработку законов управления движением колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин с целью повышения безопасности и энергоэффективности при лесозаготовительных работах.



Научная проблема

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

Для достижения цели исследования сформулированы и решены следующие научные задачи:

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.

Научная новизна работы заключается в разработке коллаборативной технологии заготовки древесины, методов, позволяющих определить рациональные технические характеристики трансмиссий и технологического оборудования на этапе проектирования, включая комплекс математических моделей и законов управления движением беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин.

1. 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. 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. Законы управления движением беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин, 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, отличающихся моделированием трелевки на виртуальной лесосеке и движением без нагрузки с целью повышения безопасности и энергоэффективности транспортных операций и расчета нагруженности агрегатов и узлов машин.

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.

Предметом исследования являются конструктивно-компоновочные решения и законы управления колесных и гусеничных БПТМ, обеспечивающих безопасность и энергоэффективность заготовки древесины.

Объектами исследования являются беспилотные колесные и гусеничные трелевочные машины для хлыстовой технологии заготовки древесины.

Практическая значимость работы заключается:

1. В разработанных программных реализациях математических моделей движения колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин при трелевке на виртуальной лесосеке с целью прогнозирования энергоэффективности операций и нагруженности элементов лесозаготовительных машин на этапе проектирования.

2. В рекомендациях по выбору технических характеристик колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин с различным трелевочным оборудованием для хлыстовой заготовки древесины.

Реализация результатов работы: Результаты работы внедрены в ПАО «КАМАЗ», АО «Курганмашзавод»-«Рубцовск», ООО Завод «Алтайлесмаш», ООО «ЛЕСТЕХ-ФИНАНС», а также используются в учебном процессе кафедры «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса» МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждается соответствующими актами.

На защиту выносятся положения научной новизны, выводы и результаты исследований:

1. Коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами.

2. Комплекс математических моделей движения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин при выполнении трелевочных операций.

3. Законы управления движением беспилотными трелевочными колесными и гусеничными машинами по заданным траекториям.

4. Разработанная виртуальная лесосека для моделирования трелевочных операций с параметризованными характеристиками дорожно-грунтовых условий.

5. Метод определения рациональных технических характеристик трансмиссии и технологического оборудования БПТМ с использованием виртуальной лесосеки и моделирования трелевочных операций.

6. Результаты сравнительного технико-экономического исследования коллаборативной технологии заготовки древесины с использованием имитационного математического моделирования рабочих процессов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

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.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследований 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.

Глава 1. Анализ состояния вопроса. Постановка задач исследования

Такой совокупностью эксплуатационных свойств как технико-экономические, подвижность, надежность и др. характеризуется лесозаготовительная машина, предназначенная для трелевки древесины [14, 47, 78]. Для формирования эксплуатационных показателей и основных значимых параметров трелевочных машин необходимо выполнить анализ условий эксплуатации лесных трелевочных машин [48, 79].

Создание методов разработки беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин должно базироваться на проведенном анализе работ в области исследования и проектирования колесных и гусеничных лесных машин, а также на основе совершенствования процесса трелевки древесины и оптимизации технологических процессов лесосечных работ [9, 10, 53, 80, 120].

При исследовании движения лесозаготовительных машин, предназначенных для трелевки древесины, необходимо рассмотреть вопросы взаимодействия колесных и гусеничных машин с опорными поверхностями в сельском хозяйстве, транспортном комплексе, военном деле и дорожном строительстве [7, 11, 41, 42, 69, 117, 126, 129].

С целью обоснования возможности применения и определения места беспилотных трелевочных машин в технологии лесозаготовок необходимо провести обзор и анализ существующих технологий хлыстовой и сортиментной заготовки древесины, изучить системы распознавания условий движения и управления движением беспилотных машин [51, 82, 93, 135, 145, 157, 172].

На основе проведенного обзора и анализа существующих технологий заготовки древесины необходимо разработать технологию заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами, позволяющую повысить безопасность и энергоэффективность при выполнении операций трелевки и экономическую эффективность лесозаготовок.

1.1. Анализ условий эксплуатации и технологии применения трелевочных машин

Система машин (СМ) лесозаготовительного предприятия (ЛЗП) представляет собой комплекс специализированной техники, которая обеспечивает эффективное проведение основных работ при рубках промежуточного и главного пользования с достижением наивысшей производительности [134]. Выбор машин, входящих в систему, определяется совокупностью природных и производственных факторов, характерных для конкретного предприятия: таксационные показатели, параметры окружающей среды, виды и методы рубок, объемы заготовок по каждому из них и др. Оптимальный состав оборудования должен формироваться с учетом взаимосвязанных технических и технологических параметров, что требует анализа основных природных и производственных условий.

Для общей оценки рельефа в лесозаготовительных районах принимается распределение покрытых лесом площадей по крутизне склонов (Рис. 1.1). Площади делятся на три группы: с уклонами $0 \dots 15^\circ$ (трелевочные машины могут работать в течение всего года); $16^\circ \dots 25^\circ$ (трелевочные машины применимы только в сухую погоду летом); 26° и более (трелевка машинами запрещена, требуется применение дистанционных трелевочных средств).

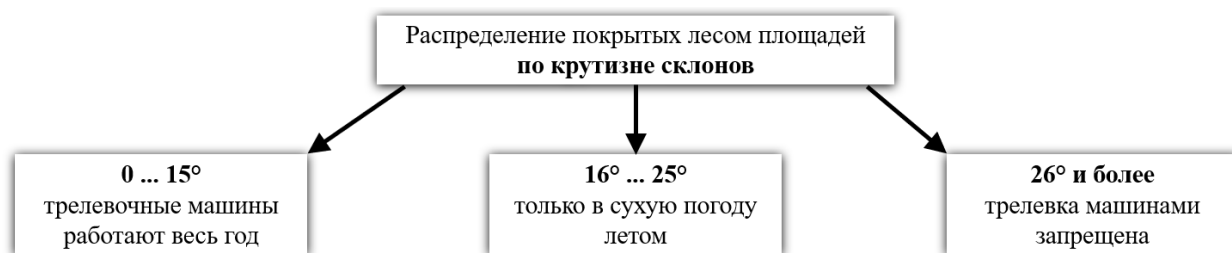


Рис. 1.1. Распределение покрытых лесом площадей по крутизне склонов

Имеющиеся данные по высоте пней на лесосеке очень ограничены. Обследование высоты пней на волоках, где работали колёсные лесозаготовительные машины Советском и Комсомольском ЛПХ ВПО «Тюменьлеспром», дало следующие результаты: средняя высота пня до трелёвки 22 см, после трелёвки 29 см, среднеквадратичные отклонения соответственно равны 7,8 см и 8,7 см.

максимальная высота пней составляла до трелёвки 45 см, а после трелёвки 52 см. среднее расстояние между пнями по обеим колеям – 5 м [47]. Для территории Швеции 75% препятствий по высоте не превышают 40 см, а 90% - 60 см.

Почвы для лесосечных работ делятся на четыре категории (Рис. 1.2).

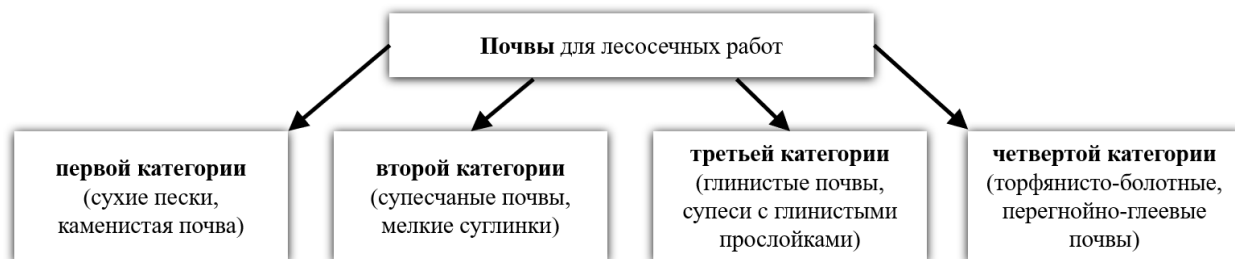


Рис. 1.2. Почвы для лесосечных работ

Древесину заготавливают круглый год. Основные операции включают валку (спиливание, повал), формирование пачек, обрезку сучьев, раскряжёвку, трелёвку (транспортировку), погрузку и разгрузку. Вывозка может осуществляться в виде деревьев, хлыстов, полухлыстов, сортиментов или технологической щепы. При крупных объемах заготовок чаще вывозят хлысты или целые деревья, при небольших - сортименты. На сплошных рубках используют сеть нижних складов с высокопроизводительным оборудованием, что сокращает количество операций на лесосеке.

Трелёвка – основная операция, при которой тракторы преодолевают сопротивление снега, заболоченных участков, пней, упавших деревьев и водных преград, совершая частые манёвры с переключением передач и реверсированием движения.

Погрузка выполняется челюстными погрузчиками на базе трелёвочных или промышленных тракторов. Тракторы также используются как энергетическая база для валочных, валочно-пакетирующих, сучкорезных и многооперационных машин. Для трелевочных машин характерен циклический характер работы (Рис. 1.3).

Машины с пачковыми захватами (скиддеры) в среднем перевозят 4-6 м³ за рейс, совершая 40-50 ездов за смену. Среднее время рейса при трелёвке на 150-250 м составляет 330-390 с (захват пачки - 50-70 с, сброс - 22-42 с).

Чокерные трелёвочные машины работают с большей нагрузкой (на 30-50%), но меньшим числом рейсов. Время цикла – 720-900 с (включая сбор пачки - 180-240 с, отцепка - 120-180 с).



Рис. 1.3. Характер работы трелёвочных машин

Скорость движения трелёвочных машин увеличивается с ростом расстояния трелёвки. В тяжелых условиях скорость перемещения техники без груза составляет от 1,39 до 1,95 м/с, с грузом от 0,97 до 1,25 м/с. На грунтах с благоприятными характеристиками скорость увеличивается до 3,33 м/с. Наиболее эффективное расстояние для трелёвки составляет порядка 250 м; если оно превышает 250 м, производительность колёсных машин начинает падать.

Для трелёвочного трактора наиболее энергоемкой операцией является грузовой (рабочий) ход, определяющим эксплуатационным показателем – рейсовая нагрузка, зависящая от природных (характеристика насаждений) и грунтовых условий, характеристики поверхности и производственно-технологических факторов (технологический процесс, расстояние трелевки и др.). Определенная с учетом этих факторов оптимальная рейсовая нагрузка является основой для установления главных параметров машины (массы, мощности, скорости движения).

1.1.1. Факторы природного и производственного характера

Природные и производственные условия играют ключевую роль в передвижении лесозаготовительной техники по лесосеке, а также на выполнение таких операций, как трелёвка, валка деревьев, обрезка сучьев и раскряжёвка

хлыстов. Значения данных факторов могут значительно варьироваться даже в рамках одного предприятия.

В таблице 1 представлена классификация природно-производственных факторов.

Таблица 1.

Классификация природно-производственных факторов

Группа факторов	Характеристики и параметры
Климатические	Погодные условия, включая температурный режим, интенсивность и периодичность дождей и снега, направление и сила ветра, высота снежного покрова и другие климатические особенности.
Почвенно-грунтовые	Разновидности и свойства грунтов, влажность, плотность, механический состав, рельеф местности, несущая способность грунта.
Лесорастительные	Средний объем деревьев, породный состав, длина и диаметр стволов, запас древесины на гектар, наличие подроста, захламленность участка, распределение древостоя.
Технологические	Расстояние трелевки, применяемые технологии, состав операций, площадь лесосеки.
Производственные	Режим работы (сменность), запланированные показатели выработки, степень использования техники, способы лесозаготовки (рубки), сроки выполнения работ, типы машин, их эксплуатационные характеристики, квалификация операторов.

Ключевые факторы эффективности лесозаготовок:

- рельеф местности (влияет на организацию работ и проходимость техники).
- средний объем хлыста;
- почвенно-грунтовые условия;
- ликвидный запас древесины на гектар (определяет объем подготовительных работ и производительность);
- породный состав насаждений.

Рельеф и несущая способность грунта напрямую связаны с возможностью использования трелевочных машин. В последние годы особое внимание уделяется экологическому взаимодействию техники и лесной среды. [8, 119, 142, 152, 166].

1.1.2. Классификация рубок и их влияние на технологию

Основным критерием для классификации технологических процессов лесозаготовок является вид вывозимой древесины [6, 82, 135, 137, 145, 172]. Выделяют пять типов представленные в таблице 2 [151, 171].

Таблица 2.

Вид вывозимой древесины

Вывозка				
ТП-0 деревьев с корнями	ТП-1 деревьев	ТП-2 хлыстов	ТП-3 сортиментов	ТП-4 технологической щепы

Выбор технологии зависит от вида и способов рубки. При этом лесозаготовительная техника воздействует на следующие элементы: прилегающий лесной массив; почвенный покров; сохраненные деревья и подрост на лесосеке.

Способы рубок с сохранением подроста предполагают, что оставшегося молодняка достаточно для естественного восстановления леса.

Технологические направления освоения лесосек.

Несплошные рубки – минимизируют воздействие на природную среду, обеспечивая непрерывное восстановление леса.

Сплошные рубки с сохранением подроста – включают меры для сокращения затрат и ускорения восстановления (сохранение хвойного подроста, почвенного покрова, семенных участков).

Сплошные рубки с полным лесовосстановлением – требуют дополнительных работ по воспроизводству леса.

Типы систем машин для разных технологий.

Заготовка деревьями:

- вариант 1: ВПМ (валочно-пакетирующая машина), БТМ (бесчokerная трелевочная машина), ЛП (лесопогрузчик);
- вариант 2: ВТМ (валочно-трелевочная машина) + лесопогрузчик.

Заготовка хлыстами:

- вариант 1: ВПМ, БТМ, сучкорезная машина, лесопогрузчик;

- вариант 2: ВТМ, сучкорезная машина, лесопогрузчик;
- вариант 3: ВСМ (валочно-сучкорезная машина), БТМ, лесопогрузчик;
- вариант 4: ВСТМ (валочно-сучкорезно-трелевочная машина) – универсальный комбайн.

Условия работы систем машин:

- согласование технических и технологических параметров оборудования;
- обеспечение гибкости технологических процессов;
- соблюдение лесоводственных требований;
- возможность применения различных видов рубок.

1.1.3. Классификация колесных и гусеничных лесозаготовительных машин

Активные поиски эффективных решений при проектировании технологических процессов лесосечных работ и подборе специализированной техники начались в 70-х годах XX века. С этого времени ведется активная разработка и внедрение новой лесозаготовительной техники, направленной на сокращение ручного труда и повышение производительности. Однако современные машины отличаются высокой стоимостью, большим весом, а их эксплуатация нередко усиливает негативное влияние рубок на экосистемы и формирование лесных биогеоценозов [59, 62].

Это привело к необходимости разработки методик выбора техники для различных операций с учетом ее эффективного использования.

Над усовершенствованием технологий и оборудования для лесосечных работ работали крупные коллективы ученых, конструкторов, инженеров машиностроительных заводов и лесозаготовительных предприятий. Среди ключевых исследований следует отметить работы В.И. Алябьева, Г.К. Виногорова, К.И. Вороницына, Ю.Н. Венценовцева, Э.Ф. Герца, И.В. Григорьева, А.Т. Гурьева, М.И. Зайчика, В.М. Захарикова, Н.Ф. Ковалева, В.Г. Кочегарова, В.М. Котикова, В.Ф. Кушляева, А.П. Матвейко, В.Н. Меньшикова, П.М. Мазуркина, В.И. Обыденникова, С.Ф. Орлова, В.С. Петровского, В.И. Пятакина, А.П. Полищука, А.К. Редькина, И.В. Турлая, Ю.А. Ширнина, С.Б.

Якимовича, и других. Результатом их деятельности стало создание новой техники и разработка научных основ организации лесосечных работ.

Практика эксплуатации лесозаготовительных машин показывает, что их функционирование в различных природных условиях, нестабильная надежность, а также различия в подходах к управлению на предприятиях делают необходимым детальный анализ при подборе технологических процессов и систем машин [46].

Типизация природно-производственных условий для лесозаготовок проводилась неоднократно [15, 17, 36]. В большинстве исследований классификация основана на анализе реальных условий с выделением ключевых факторов.

Такой подход оправдан при выборе конкретных машин и технологических схем, хотя в отдельных случаях могут встречаться нетипичные условия [57, 58, 61]. Однако такой подход не учитывает степень влияния каждого фактора на общий объем заготовки древесины.

Основными критериями выбора технологий и машин являются таксационные и лесотипологические характеристики лесосечного фонда. Исследования отечественных ученых в разные периоды способствовали оптимизации параметров оборудования, отражая уровень механизации, социальные и экологические аспекты лесопользования. В настоящее время основные технологические схемы лесосечных работ предполагают использование систем машин.

Проблемы классификации технологических процессов на лесосеках рассматривались различными исследователями. Наибольший вклад в эту область внесли работы С.Ф. Орлова и В.Г. Кочегарова. Анализ процессов проходящих в лесосечных работах, как сложной иерархической системы представлен в трудах В.Н. Меньшикова, В.Ф. Кушляева, Г.К. Виногорова, и других ученых. Однако в этих исследованиях недостаточно учитывались способы выполнения операций лесосечных работ и их влияние на лесную среду.

Воздействие лесозаготовительной техники на экосистемы изучалось как в России (Г.К. Виногоров, В.М. Котиков, Д.Г. Мясищев, В.И. Обыденников, В.С. Сюнев, Ю.Н. Ягудин и др.), так и за рубежом (Wasterlund I., Leinss C.,

Athanassiadis D. и др.). Однако до сих пор не разработано аналитических моделей, позволяющих оценивать риски повреждения древостоя при проведении выборочных рубок.

Исследования А.В. Жукова, И.В. Григорьева, В.А. Александрова, М.И. Зайчика, Г.М. Анисимова, В.М. Котикова, А.М. Гольдберга, А.М. Кочнева, Б.А. Ильина, С.Ф. Орлова, В.Г. Кочегарова, В.Б. Прохорова, В.П. Немцова и других посвящены изучению влияния природно-производственных факторов на надежность, нагруженность и эффективность лесозаготовительных машин (ЛЗМ).

Вопросы надежности и обеспечения запчастями с применением вероятностно-статистических методов рассмотрены в работах В.В. Амалицкого, В.Н. Андреева, Ю.А. Добрынина, А.В. Питухина и др.

Изучение воздействия техники на лесорастительные условия и возобновление леса ведется с начала механизации лесозаготовок. М.Е. Ткаченко и ряд других исследователей первыми сформулировали лесоводственные требования к технике, предложив классификацию почв по степени повреждения. Впоследствии были созданы более подробные классификации, охватывающие от трёх до девяти групп.

Изучением воздействия современной лесозаготовительной техники на почву и молодые деревья (подрост) занимались такие исследователи, как В.И. Пятакин, Л. Кайрюкштитс, Г.В. Яковлев, В.И. Исаев и другие.

Работы В.П. Горячкина и В.А. Желиговского посвящены анализу изменений физико-механических характеристик почв под влиянием движителей машин. Основы теории движения колесных и гусеничных машин были заложены Е.Д. Львовым и Е.А. Чудаковым, а в дальнейшем развиты И.Г. Беккером, И.П. Ксеновичем, В.В. Гуськовым, А.С. Агейкиным, и другими учеными.

Вопросами теории движения лесотранспортных и лесохозяйственных машин, трелевочных тракторов и лесозаготовительных машин, а также их взаимодействия с почвами лесных массивов исследовали С.Ф. Орлов, Г.М. Анисимов, М.И. Зайчик, Н.И. Библюк, В.И. Алябьев, А.В. Жуков, В.Н.

Винокуров, В.М. Котиков, Л.А. Гоберман, Я.В. Слодкевич, В.К. Курьянов, Д.И. Шеховцов, В.П. Немцов, Ю.Д. Силуков и другие.

Обобщая эти работы, можно сделать вывод, что при выборе техники учитываются способ заготовки (хлыстовой или сортиментный) и природно-производственные условия.

Выбор техники для лесозаготовок зависит от типа древесины и требует учета ее технических характеристик, эксплуатационных возможностей и оснащения.

Классификация трелевочных машин.

Наиболее распространенным методом лесозаготовок является трелевка тракторами. На заболоченных участках и в горной местности применяют канатные установки.

По типу перемещаемых материалов различают трелевку: деревьев, хлыстов, сортиментов.

По способу перемещения:

- волоком (без погрузки);
- в полупогруженном положении (часть пачки на машине, часть волочится);
- в полностью погруженном положении (трелевка сортиментов; с использованием прицепа трелюются деревья или хлысты).

На Рис. 1.4. представлены способы трелевки деревьев и хлыстов беспилотными машинами.

Специальные трелевочные машины оснащены оборудованием для сбора, формирования и транспортировки пачки. Их конструкция предусматривает переднее расположение двигателя и кабины, а заднюю площадку для груза. Машины для сортиментной заготовки имеют манипулятор с грейферным захватом и кониковую площадку.

Тракторы общего назначения не предназначены для трелевки, но могут быть дооборудованы на предприятиях. Они делятся на:

- гусеничные - с балансирной подвеской, обеспечивающей плавность хода и проходимость;

- колесные - с шарнирно-сочлененной рамой, высокой маневренностью, мощностью и скоростью, но ограниченной проходимостью на слабых грунтах или глубоком снежном покрове.

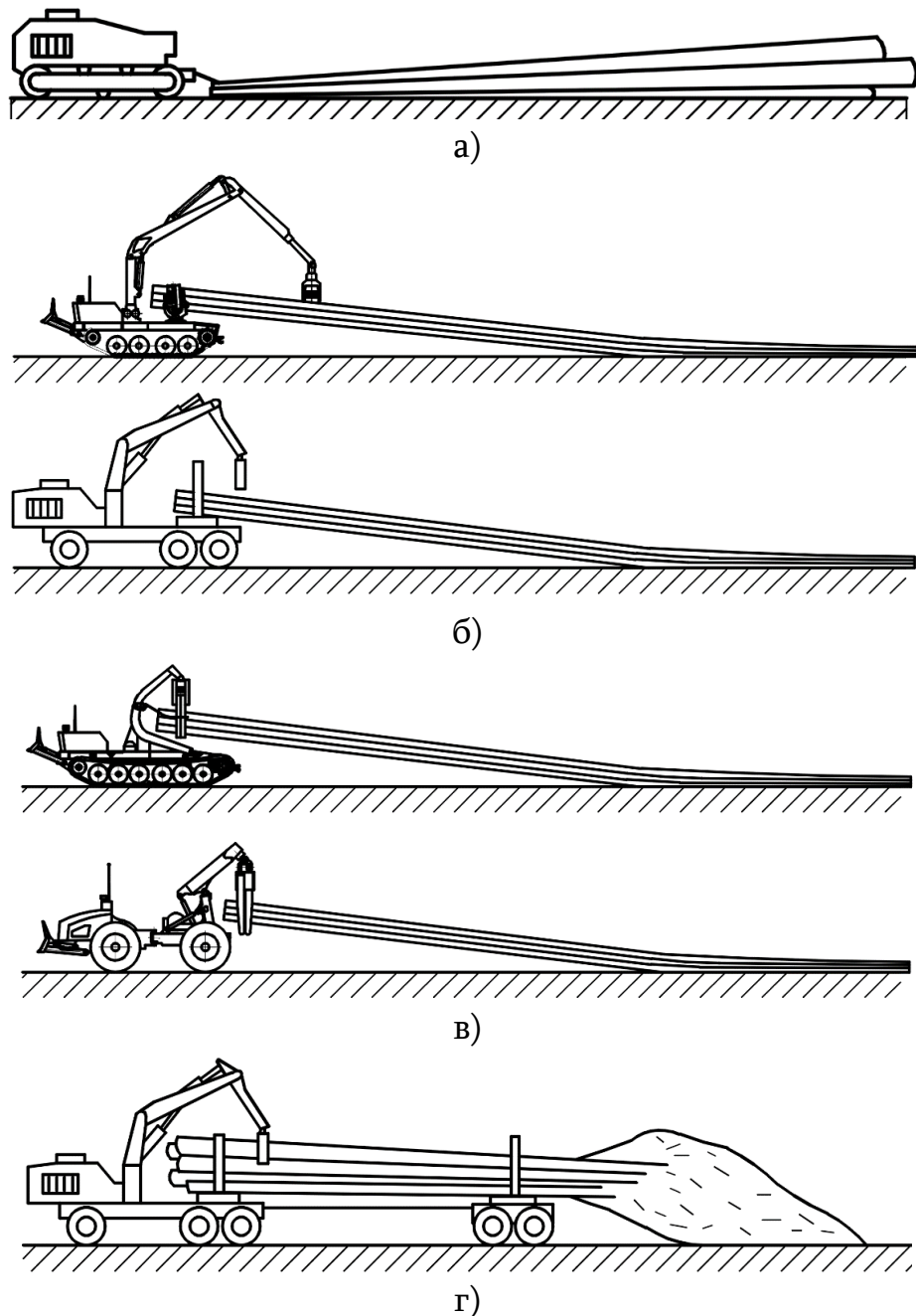


Рис. 1.4. Способы трелевки деревьев и хлыстов беспилотными машинами:

а - волоком; б, в - в полупогруженном положении; г - в полностью погруженном положении на прицепе

При сортиментной технологии лесозаготовок на трелевке (транспортировке) сортиментов используют погрузочно-транспортные машины (форвардеры)

Погрузочно-транспортные машины (форвардеры) можно разделить на 5 классов по размерам и мощности (Таблица 3).

Таблица 3.

Классификация погрузочно-транспортных машин для сортиментной технологии

Тип машины	Коле са, шт.	Собст. вес, тонн	Грузо- подъем- ность, тонн	Мощн. Двиг., кВт	Средний грузоподъемный момент манип., кНм
ПТМ для рубок ухода	6	Менее 10	3 – 8	20 – 80	40
ПТМ для выборочных рубок	4 (6) (8)	10	8	80	65
ПТМ универсальные для сплошных и выборочных рубок	6 (8)	12	10	90	85
ПТМ для сплошных рубок	6 (8) (10)	15 – 16	14	120 – 160	100
Тяжелые ПТМ для сплошных рубок	8	18 и более	14 – 20	160 - 250	180

При росте массы и грузоподъёмности машины увеличиваются её размеры, что влияет на ширину волока, ухудшает манёвренность и повышает давление на грунт. Это способствует более интенсивному образованию колеи, особенно на слабых грунтах. Однако форвардеры с высокой грузоподъёмностью требуют меньше проходов по одному волоку, что уменьшает их негативное воздействие на почву.

Конструкция колёсных форвардеров среднего и тяжёлого классов основана на шарнирно-сочленённой раме. На передней полураме располагаются двигатель и кабина, а на задней – платформа для перевозки сортиментов. Манипулятор с грейферным захватом может быть установлен как перед центральным шарниром (на первой полураме), так и за ним (на второй полураме).

В Таблице 4 представлены основные характеристики техники для хлыстовой заготовки древесины.

Выбор техники зависит от:

среднего объема ствола (мелкий – до 0,39 м³, средний – 0,4–0,6 м³, крупный – свыше 0,65 м³);

рельефа (уклоны до 15° – работа круглый год, 16–25° – только в сухую погоду, свыше 26° – трелевка запрещена).

Таблица 4.

Лесозаготовительная техника для хлыстовой технологии

Признак	Категория	Характеристики
Тип движителя	Гусеничные	Высокая проходимость, устойчивость на болотах и сложном рельефе, но низкая скорость.
	Колесные	Лучшая маневренность, меньше повреждают грунт, но проходимость ограничена.
Мощность	Малые (до 100 л.с.)	Для легких работ, трелевки тонкомера на малых лесосеках.
	Средние (100–200 л.с.)	Универсальные, наиболее распространенные в умеренных условиях.
	Крупные (свыше 200 л.с.)	Для тяжелых условий, крупных и длинных хлыстов (деревьев).
Способ трелевки	Чокерные	Используют тросы и чокеры (ручной труд).
	Бесчокерные (с манипулятором)	Оснащены гидроманипулятором с захватом, высокая производительность.
Грузоподъемность	Легкие (до 5 т)	Для малых объемов и коротких расстояний.
	Средние (5–10т)	Стандартный вариант для большинства лесосек.
	Тяжелые (свыше 10 т)	Для крупных хлыстов, длительной трелевки на большие расстояния.

Важным критерием является минимизация экологического ущерба.

1.1.4. Технология лесозаготовок с использованием трелевочных машин

Трелевка является ключевым процессом транспортировки на лесосечных работах. Она включает два основных компонента: подвижной состав и путь. Наиболее простой путь на лесосеке, используемый для перемещения деревьев, хлыстов или круглых лесоматериалов, называется трелевочным волоком. В зависимости от грузооборота, назначения, конструкции и обслуживания различают пасечные и магистральные волокы. Пасечные волокы служат для перемещения по пасекам, а магистральные предназначены для транспортировки леса с трех–пяти и более пасек.

Конструкция волока определяется его планом, продольным и поперечным профилями. Расположение волоков на лесосеке зависит от выбранной схемы,

которая учитывает взаимное размещение пасечных и магистральных волоков, а также положение лесопогрузочных пунктов у лесовозных усов (Рис. 1.5). Пасечные и магистральные волокна могут располагаться по параллельной, диагональной или радиальной схемам. При параллельной схеме пасечные волокна идут перпендикулярно магистральному. Если используются челюстные лесопогрузчики, применяется параллельная схема без магистральных волоков. Такое расположение оптимально на равнинных участках, при работе валочно-пакетирующих и валочно-трелевочных машин, а также при тракторной трелевке.

Расстояние трелевки l зависит от принятой схемы расположения волоков и лесопогрузочных пунктов, размеров пасек и трелеваемой пачки, плана лесосеки и деланки, запасов и их размещения на лесосеке и направления движения лесосечных машин. В общем случае (Рис. 1.5, к)

$$l = l_{\pi} + l_{\text{м}}, \quad (1.1)$$

где l_{π} – расстояние движения трелевочной машины по пасечному волоку;
 $l_{\text{м}}$ – расстояние движения по магистральному волоку.

Магистральный волок может проходить перпендикулярно или под углом к лесовозному усу, соответственно, пасечные волокна примыкают к нему под прямым или косым углом, формируя диагональную или радиальную схему. Диагональная схема применяется при тракторной трелевке в холмистой местности, а также на равнинных лесосеках с участками неэксплуатационной площади. На прямых склонах горных лесосек волокна прокладываются параллельно друг другу и перпендикулярно лесовозному усу.

Пасеки, пасечные и магистральные волокна, лесопогрузочные пункты или верхние лесосклады образуют площадь деланки части лесосеки, тяготеющей к одному лесоскладу. При прямоугольной деланке и равномерном распределении запасов древесины $l_{\pi} = b_{\pi} / \cos \alpha_{\pi}$; $l_{\text{м}} = a_{\text{м}} / \cos \alpha_{\text{м}}$, а расстояние трелевки

$$l = b_{\pi} / \cos \alpha_{\pi} + a_{\text{м}} / \cos \alpha_{\text{м}}, \quad (1.2)$$

где: b_{π} – длина пасеки; $a_{\text{м}}$ – длина части магистрального волокна, тяготеющего к пасечному волоку; α_{π} , $\alpha_{\text{м}}$ – соответственно углы примыкания пасечного волокна к одной из сторон деланки и магистрального волокна к усу.

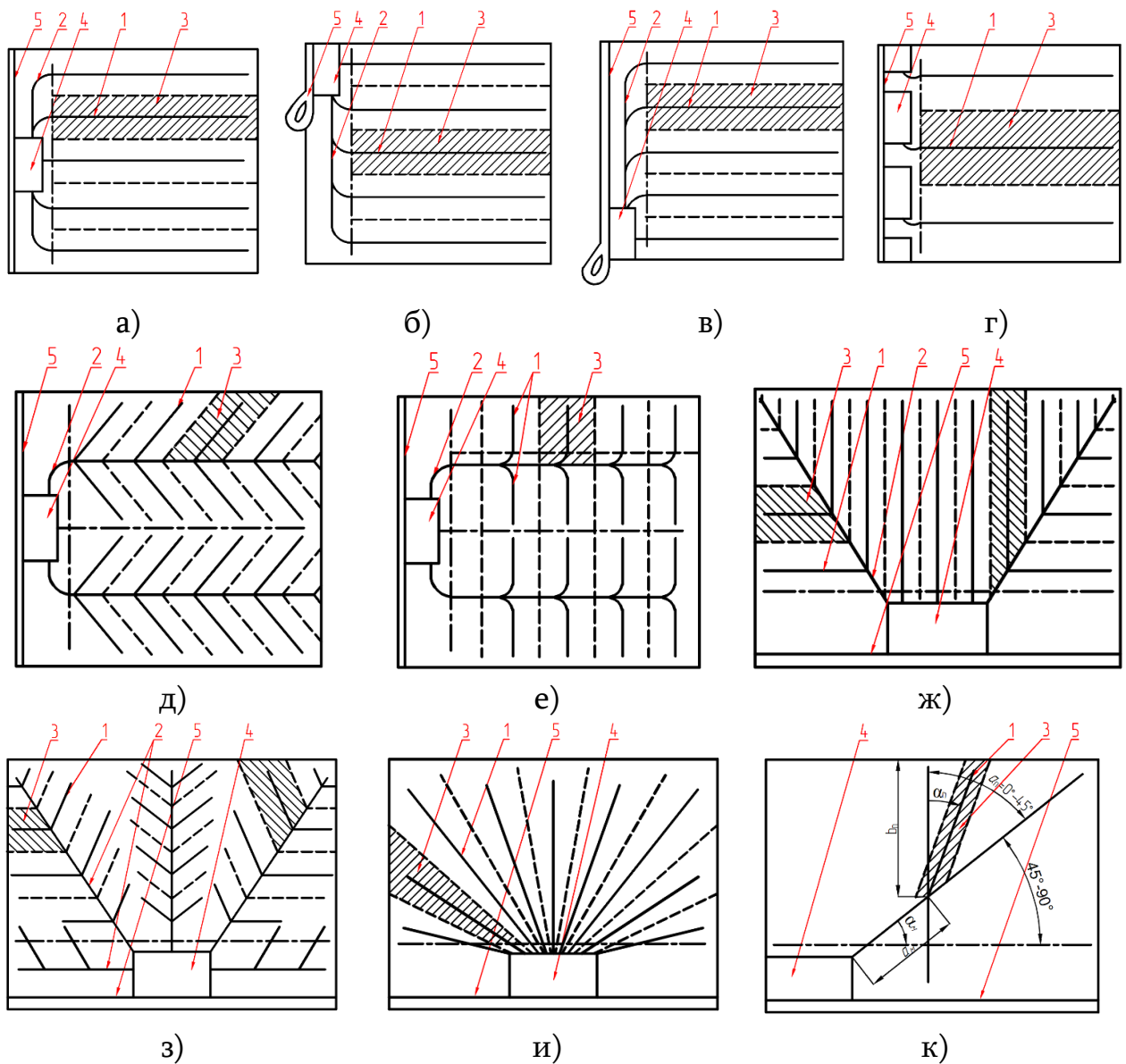


Рис. 1.5. Расположение волоков на делянках: а, б, в, г, д, е - параллельное с магистральным волоком и без него, перпендикулярное или под углом к нему; ж - диагональное; з, и - радиальное с магистральным и без него; к — расчетная схема расстояния трелевки; 1, 2 - пасечный и магистральный волокни; 3 - пасека; 4 - верхний лесосклад или лесопогрузочная площадка; 5 - лесовозный ус

Длина пасеки возрастает по мере удаления места формирования пачки от лесопогрузочного пункта. Углы примыкания пасечных волоков зависят от принятых схем: при параллельной схеме $\alpha_n = 90^\circ$, при радиальной и диагональных схемах пасечные волокни примыкают к делянке под углом 45° , при радиальной - под углом $45 - 90^\circ$. Магистральные волокни при параллельной схеме

примыкают к лесовозному уссу под углом 90° , при диагональной и радиальной схемах под углом $30 - 45^\circ$.

Для расчета размеров делянок, производительности трелевочных машин, выбора места расположения лесопогрузочных пунктов требуется определить среднее расстояние трелевки $l_{\text{ср}}$. При равномерном распределении запаса древесины по площади делянки средним можно считать расстояние трелевки от геометрического центра делянки до участка лесосеки у места разгрузки трелевочной машины на верхнем лесоскладе. Если запасы Q на лесосеке размещаются неравномерно, то определяют средневзвешенное расстояние трелевки $l_{\text{ср}}$ через грузовую работу R :

$$l_{\text{ср}} = R / Q, \quad (1.3)$$

$$R = \sum q_{\text{п}} l_{\text{п}}; \quad Q = \sum q_{\text{п}};$$

$$l_{\text{ср}} = \sum (q_{\text{п}} l_{\text{п}}) / \sum q_{\text{п}}, \quad (1.4)$$

где $q_{\text{п}}$ - запасы древесины на лесосеке или отдельном ее участке, м^3 ;

$l_{\text{п}}$ - расстояние трелевки запасов к лесопогрузочному пункту, м.

При параллельной схеме расположения пасечных и магистральных волоков (наиболее распространенной в практике) $l_{\text{ср}}$ определяют как сумму расстояний трелевки из центра пасеки и из середины магистрального волока для средней пасеки, т. е. $l_{\text{ср}} = 0,5a + 0,5b$.

При составлении схем волоков на лесосеке необходимо учитывать рельеф местности, особенности почвогрунта, направление трелевки и т.д. При разметке волоков необязательно стремиться к их прямолинейности (необходимо учитывать рельеф и состояние почв).

Форма и глубина волока, т.е. его поперечный профиль, зависят от количества проходов трактора и от почвенно-грунтовых условий. Устройство трелевочных волоков заключается в разметке и разрубке их со спиливанием деревьев на всей ширине волока, а также в разделке и трелевке товарных валежных деревьев. На сырых заболоченных лесосеках требуется выстилка волоков сучьями, а на зимних лесосеках - проминка снега. Ширина трелевочного волока как пасечного, так и магистрального при любых способах рубок должна быть не менее 5 м. Волоки, проложенные по косогору, должны быть не менее 7

м. Разметку волоков обычно проводят непосредственно перед разработкой лесосеки. При разметке необходимо по возможности обходить крупные пни, валуны и другие препятствия, так чтобы рабочая часть волока была свободной для работы машины без помех. На сырых и заболоченных лесосеках выстилку волоков производят на всем их протяжении или только на слабых участках. В условиях пересеченного рельефа для подготовки волоков проводят земляные работы. Для этих целей обычно достаточно бульдозера. Для расчистки волоков от снега и валежника можно использовать отвал трелевочных тракторов. На очень слабых грунтах устраивают сплошной настил.

1.1.5. Применение трелевочных машин при хлыстовой технологии лесозаготовок

Технология заготовки древесины (Рис. 1.6) деревьями в основном предусматривает два варианта. При первом используются челюстной лесопогрузчик (ЛП), бесчokerная трелевочная машина (БТМ) и валочно-пакетирующая машина (ВПМ), а во втором варианте применяется лесопогрузчик и валочно-трелевочная машина (ВТМ).

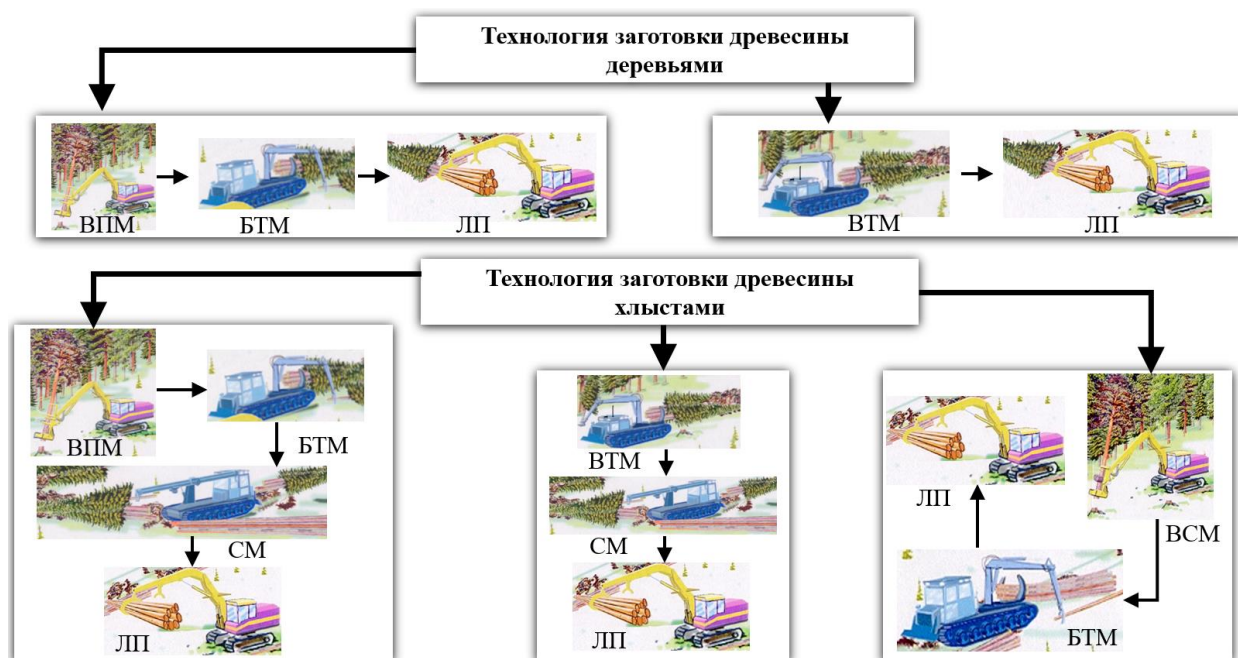


Рис 1.6. Варианты при хлыстовой технологии лесозаготовок использования трелевочных машин

При хлыстовой технологии лесозаготовок используются четыре варианта. К первому варианту относятся машины ВПМ, БТМ, сучкорезная машина (СМ) и ЛП. Ко второму ВТМ, СМ и ЛП. Третий вариант предусматривает использование валочно-сучкорезной машины (ВСМ), БТМ и ЛП, а четвертый вариант включает в себя использование универсальной лесозаготовительной машины - валочно-сучкорезно-трелёвочная машина (ВСТМ), совмещающая функции валки, обрезки сучьев и трелёвки – так называемый лесной комбайн для заготовки хлыстов.

На Рис. 1.7-1.8 показаны варианты организации лесосечных работ:

- технология заготовки хлыстов с обработкой деревьев вдоль пасечного волока, где для укрепления волока используются вершины и сучья;
- технология заготовки хлыстов с формированием крупных пачек для последующей трелёвки, при этом волок укрепляется древесными отходами (вершинами и сучьями).

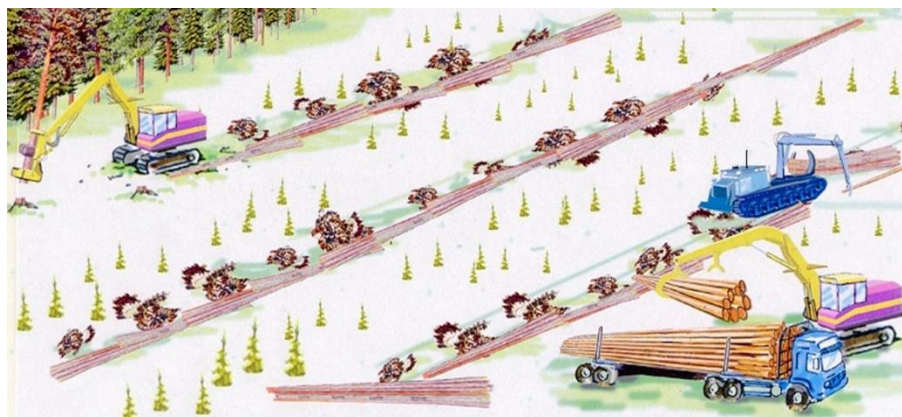


Рис. 1.7. Схема процесса заготовки хлыстов с обработкой деревьев по оси пасечного волока и укреплением его древесными отходами



Рис. 1.8. Схема процесса заготовки хлыстов с созданием укрупнённых пачек для трелёвки с укреплением волока отходами древесины

1.1.6. Основные конструктивные особенности, определяющие функциональные свойства и технические требования трелевочных машин в беспилотном исполнении

С целью формирования основных конструктивных особенностей, определяющих функциональные свойства и технические требования для беспилотных трелевочных машин, необходимо:

- выполнить обзор и анализ применения существующих цифровых технологий в лесной и смежных отраслях промышленности;
- определить технологическое оборудование, которое возможно применять на трелевочных машинах в беспилотном исполнении;
- рассмотреть системы управления движением беспилотными трелевочными машинами и системы распознавания условий внешней среды.

1.1.6.1. Обзор и анализ применения существующих цифровых технологий в лесной и смежных отраслях промышленности

Беспилотные технологии – это системы, которые могут выполнять различные задачи без прямого участия человека, используя для этого специализированное программное обеспечение, датчики и другие технические средства. Беспилотные технологии включают в себя беспилотные летательные аппараты (БЛА), транспортные средства, беспилотные суда, автономные роботы и многое другое.

Основными компонентами беспилотных систем являются сенсоры (камеры, радары, лидары, датчики GPS и т.д.), которые собирают данные о внешнем мире, и программное обеспечение, которое анализирует эти данные и принимает решения о действиях системы. Примеры данных компонентов показаны на Рис. 1.9.

Первые беспилотные системы появились в 30х годах 20 века на летательных аппаратах и в 80е годы на наземных транспортных средствах. Однако с развитием технологий и снижением их стоимости беспилотные технологии стали широко применяться в мирное время [33, 85, 141, 189].



Рис. 1.9. Компоненты беспилотных систем

Сегодня беспилотные технологии активно используются в самых разных отраслях - от сельского хозяйства и лесной промышленности до транспортного сектора и служб доставки. Основные тренды в этой области — это усовершенствование сенсоров и программного обеспечения, интеграция с другими технологиями (например, искусственный интеллект и машинное обучение), а также развитие инфраструктуры для беспилотных систем (например, системы управления трафиком для беспилотных транспортных средств) [84, 128, 186]. Примеры данных транспортных средств показаны на Рис. 1.10.

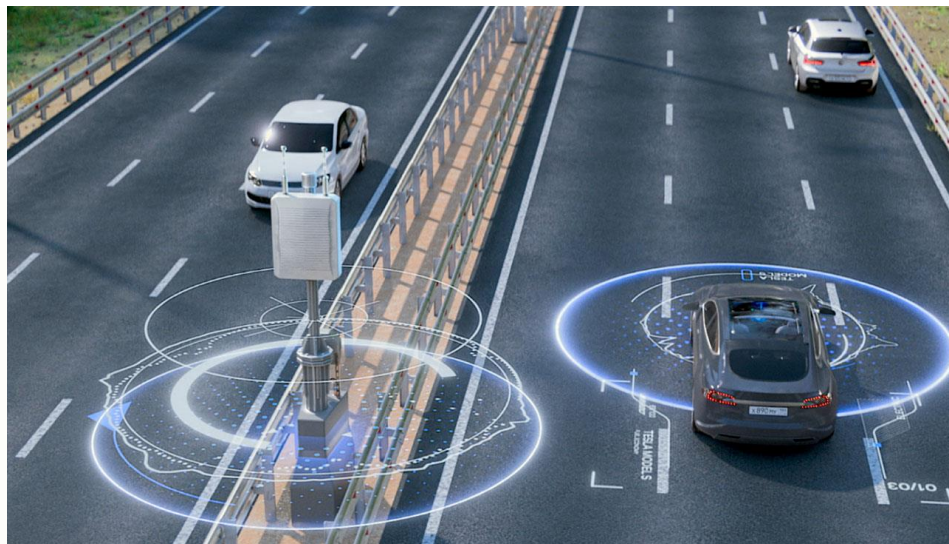


Рис.1.10. Система управления трафиком беспилотных транспортных средств

Самым массовым является применение беспилотных технологий в городском транспорте и (Рис. 1.11).



Рис. 1.11. Применение беспилотной технологии в городском транспорте

Беспилотные технологии активно применяются и в других отраслях промышленности. В сельском хозяйстве используются автономные тракторы и комбайны, которые могут обрабатывать поля без участия оператора. Компания JohnDeere, например, представила беспилотный трактор, способный самостоятельно выполнять задачи по обработке поля, включая вспашку, посев и уборку урожая. На Рис. 1.12 и 1.13 представлены беспилотные сельскохозяйственные машины компаний JohnDeere, Case и Минского тракторного завода.



Рис. 1.12. Беспилотный трактор John Deere

В горнодобывающей промышленности также активно используются беспилотные технологии. Автономные грузовики для транспортировки руды задействованы на многих крупных шахтах.



Рис. 1.13. Беспилотные тракторы Case и МТЗ

Компания Rio Tinto, например, использует автономные грузовики в своих шахтах в Австралии, что позволяет снизить затраты и увеличить безопасность работы. Грузовик Scania для Rio Tinto показан на Рис. 1.14. Другие беспилотные самосвалы показаны на Рис. 1.15.



Рис. 1.14. Беспилотный самосвал для Rio Tinto

Компания КАМАЗ представила беспилотный карьерный самосвал «Юпитер 30» (Рис. 1.16). Данный самосвал работает по схеме последовательного гибрида и является продолжением линейки карьерных самосвалов Геркулес, куда также входит беспилотный самосвал. Компания Белаз имеет большие наработки в области беспилотных карьерных самосвалов, на Рис. 1.17 показан удаленный пункт управления беспилотной машиной, на Рис. 1.18 показаны беспилотные машины Белаз.



Рис. 1.15. Беспилотные самосвалы



Рис. 1.16. Беспилотный КАМАЗ Юпитер-30



Рис. 1.17. Дистанционное управление машиной

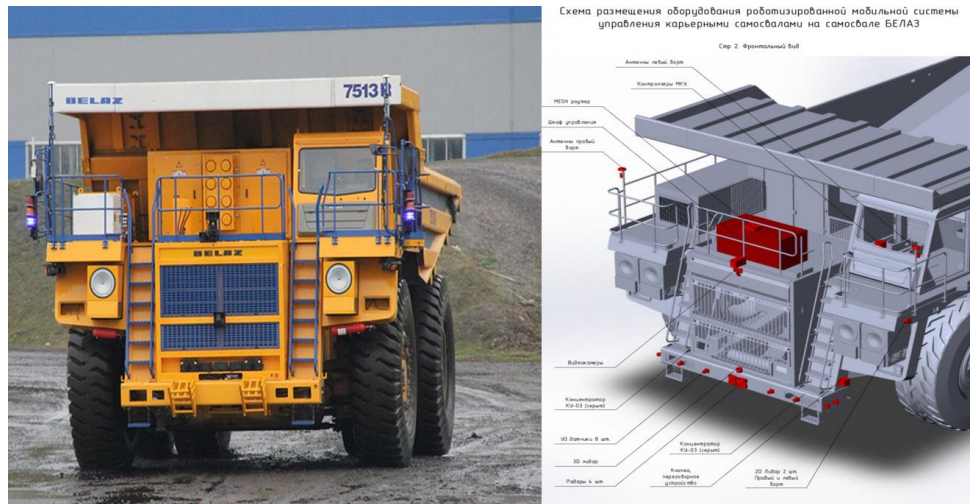


Рис. 1.18. Белаз с возможностью дистанционного управления

В строительной отрасли беспилотные технологии применяются для автоматизации различных видов работ. Беспилотные экскаваторы и бульдозеры используются для земляных работ, а беспилотные краны - для подъема и перемещения грузов на строительных площадках (Рис. 1.19).



Рис. 1.19. Мини кран BGLIFT M250

В лесной отрасли можно увидеть прогресс в области повышения уровня автоматизации на примерах продуктов начального уровня, которые обеспечивают компьютерное управление движением и полуавтоматизацию. Также появляются примеры экспериментальных образцов беспилотных

лесозаготовительных машин и других средств автоматизации высокого уровня [195, 196, 197, 198, 199, 206].

На выставке Elmia Wood 2009 шведская компания Gremo впервые продемонстрировала харвестер для промышленной лесозаготовки, управляемый дистанционно по радио, без оператора в кабине [217].

Оператор, находящийся в форвардере, дистанционно управляет одним или несколькими полуавтономными харвестерами. Проведенные исследования показывают, что этот метод может снизить затраты на окончательную рубку леса более чем на 20 процентов [217].

Современные кабины операторов лесозаготовительной техники по уровню эргономики и комфорта сопоставимы с салонами премиальных автомобилей. Для обеспечения высокой производительности труда кабина должна поддерживать оптимальный микроклимат, оснащаться системой стабилизации при работе на склонах и движении по неровной местности, а также защищать оператора в случае падения дерева на машину. Всё это делает кабину сложной и дорогостоящей инженерной конструкцией, которая увеличивает общую стоимость лесозаготовительной техники.

Исключение кабины позволяет упростить конструкцию машины и снизить её стоимость. Именно такой подход выбрала компания Gremo, представив на выставке беспилотный харвестер под названием Besten (Рис. 1.20).

Манипулятор с харвестерной головкой располагается по середине. Движитель включает шесть колес, а не восемь, как на обычных харвестерах.

Управление гидроманипулятором осуществляется посредством компьютерной системы Dasa 5. Джойстики управления расположены в машине сопровождения (форвардере).

Передача информации между машинами сопровождения (форвардерами) и харвестером Besten осуществляется при помощи компьютерной системы Dasa 5. Дискретное и аналоговое управление предотвращает коммуникационные проблемы. Исключена возможность помех от других систем с аналогичным управлением.



Рис. 1.20. Дистанционно управляемый харвестер Gremo Besten

Технология лесозаготовки с использованием радиоуправляемой машины Gremo Besten предполагает, что оператор, находящийся в форвардере, дистанционно управляет беспилотным харвестером по радио, перемещаясь за ним по мере необходимости.

Предполагается наличие двух машин сопровождения (форвардеров), которые поочередно управляют харвестером Besten, согласно схеме, представленной на Рис. 1.21).

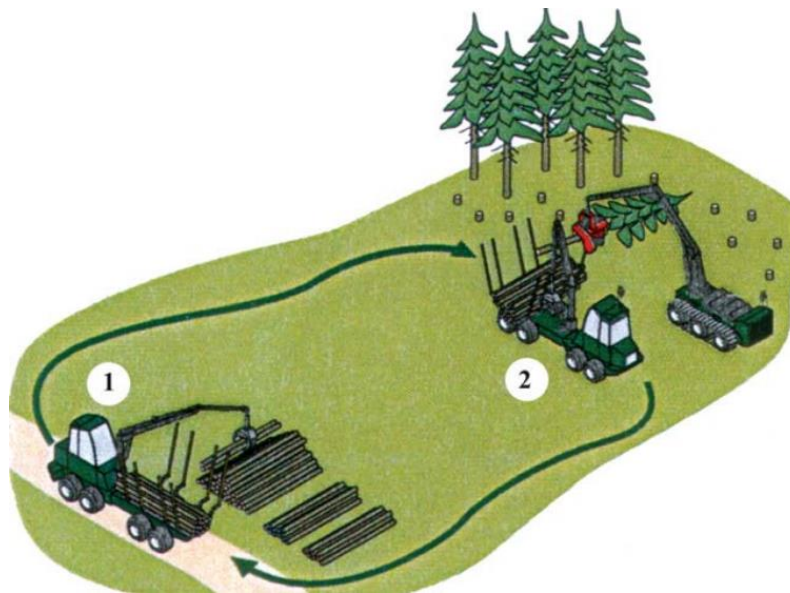


Рис. 1.21. Технология лесозаготовок с использованием харвестера Besten и двух форвардеров сопровождения

Машины сопровождения оснащены поворотной кониковой площадкой с возможностью наклона и раздвижения коников по ширине. Во время работы раскряжевка сортиментов харвестером производится прямо в грузовой отсек форвардера. Когда процесс погрузки сортиментов закончен, машина сопровождения №2 продолжает работу и оператор управляет харвестером, а машина сопровождения №1 вывозит сортименты на верхний склад для разгрузки в штабель. Последовательность выполнения лесозаготовительных операций с использованием радиоуправляемого харвестера Besten показана на Рис. 1.22 и Рис. 1.23.



Рис. 1.22. Валка дерева радиоуправляемым харвестером Besten



Рис. 1.23. Раскряжевка сортиментов радиоуправляемым харвестером Besten в кониковую площадку форвардера (машины сопровождения)

За последние годы на рынке появилось несколько продуктов начального уровня с технологией автоматизации 1-го уровня, таких как:

- манипуляторы, оснащенные датчиками движения, представляют собой продукты начального уровня, в которых используется улучшенное программное обеспечение для управления движением [93, 105];
- правление стрелой манипулятора, при котором оператор получает компьютерную поддержку для выполнения четко скоординированных движений приводом с меньшими усилиями;
- снижение вибраций при работе манипулятора, что делает эксплуатацию манипулятора более комфортной;
- активная подвеска, улучшающая плавность хода при движении по неровностям волока;
- гидравлические клапаны, оснащенные цифровой электроникой, представляют собой продукты начального уровня, в которых используется улучшенное программное обеспечение для динамического управления движением машины.

Создание более интеллектуального механизма передвижения машин будет опираться на библиотеки, содержащие специальные автоматизированные функции, многие из которых были продемонстрированы учеными за последние несколько лет [71, 98, 109, 110]. Однако оператор по-прежнему будет играть важную роль в правильном использовании этих функций, и многие сложные движения по-прежнему будут выполняться вручную.

Ожидается, что на более поздних этапах операторы смогут воспользоваться преимуществами передовых систем компьютерного зрения в рамках формирующегося партнерства человека и машины. Это, вероятно, позволит использовать новые способы управления машиной, при этом оператор будет выбирать из действий, предлагаемых компьютером. Следовательно, искусно скоординированные автоматические действия позволят заготавливать деревья, что значительно повысит производительность и снизит утомляемость оператора. К этому моменту отрасль достигнет второго уровня автоматизации. Оператор будет координировать работу машин, и технология позволит использовать машины с

большим количеством манипуляторов, поскольку манипуляторы смогут работать автономно в течение короткого времени (Рис. 1.24 и 1.25).



Рис. 1.24. Технология позволит одному оператору управлять несколькими манипуляторами одновременно, поскольку манипуляторы будут работать автономно в течение короткого времени



Рис. 1.25. Использование машин без оператора избавит от необходимости в установке кабины; автоматизация также может позволить нескольким манипуляторам работать на одной машине

Ведутся работы по созданию беспилотных машин для нужд лесного комплекса в Технологическом университете Лулео (Luleå University of Technology), Шведском университете сельскохозяйственных наук (Swedish University of Agricultural Sciences) и кластере лесных технологий [201]. По итогам работ была представлена беспилотная лесозаготовительная машина AORO (Рис. 1.26 а, б).



Рис. 1.26. Беспилотная лесозаготовительная машина AORO в исполнении харвестера

В Швеции при помощи беспилотных летательных аппаратов дистанционно управляют лесозаготовительной техникой (Рис. 1.27). На машине устанавливаются камеры. На беспилотнике установлена мобильная базовая станция 5G, которая обеспечивает покрытие в лесу, где обычно никакой связи нет вообще. И уже благодаря этому оператор удаленно управляет беспилотной машиной.

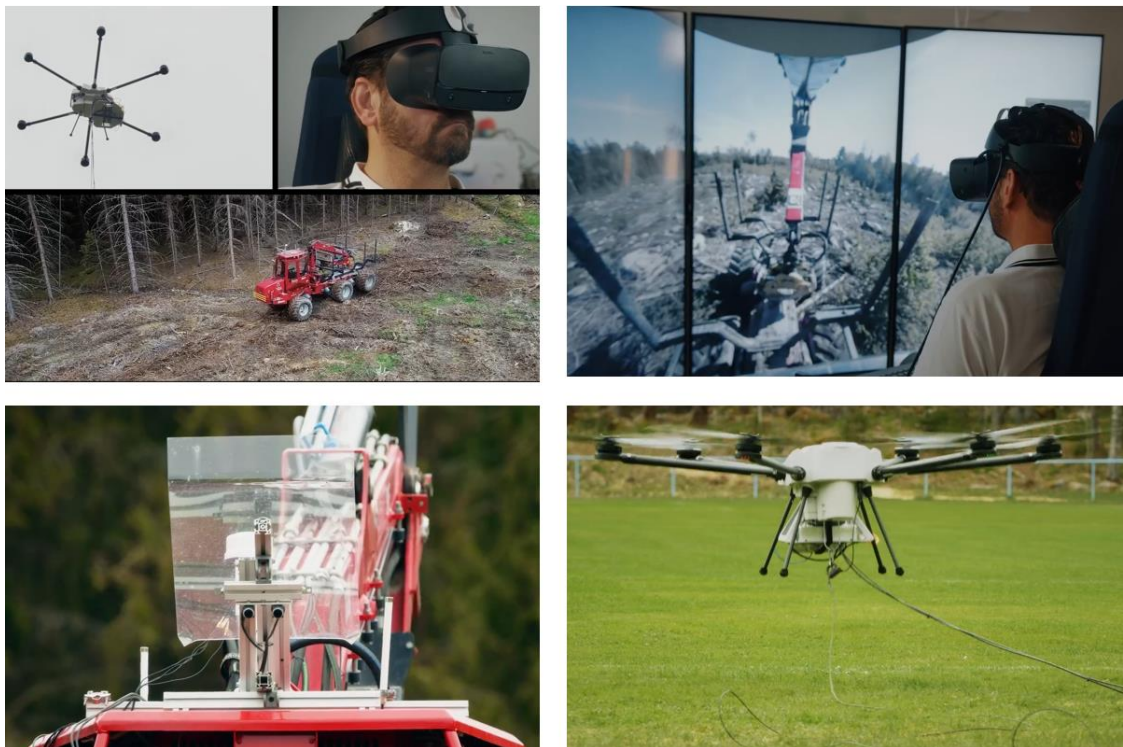


Рис.1.27. Испытания системы дистанционного управления форвардером

По заявлению разработчиков, во время испытаний беспилотник находился примерно в 500 метрах от машины, но создавал зону покрытия связью на расстоянии до 3 км. При этом оператор лесозаготовительной машины находился примерно в 90 км от самой техники, управляя ею из комфортных условий.

Также коллективом ученых из Umeå University и Swedish University of Agricultural Sciences была представлена концепция (Рис. 1.28) беспилотной погрузочно-транспортной машины и её системы управления [189].

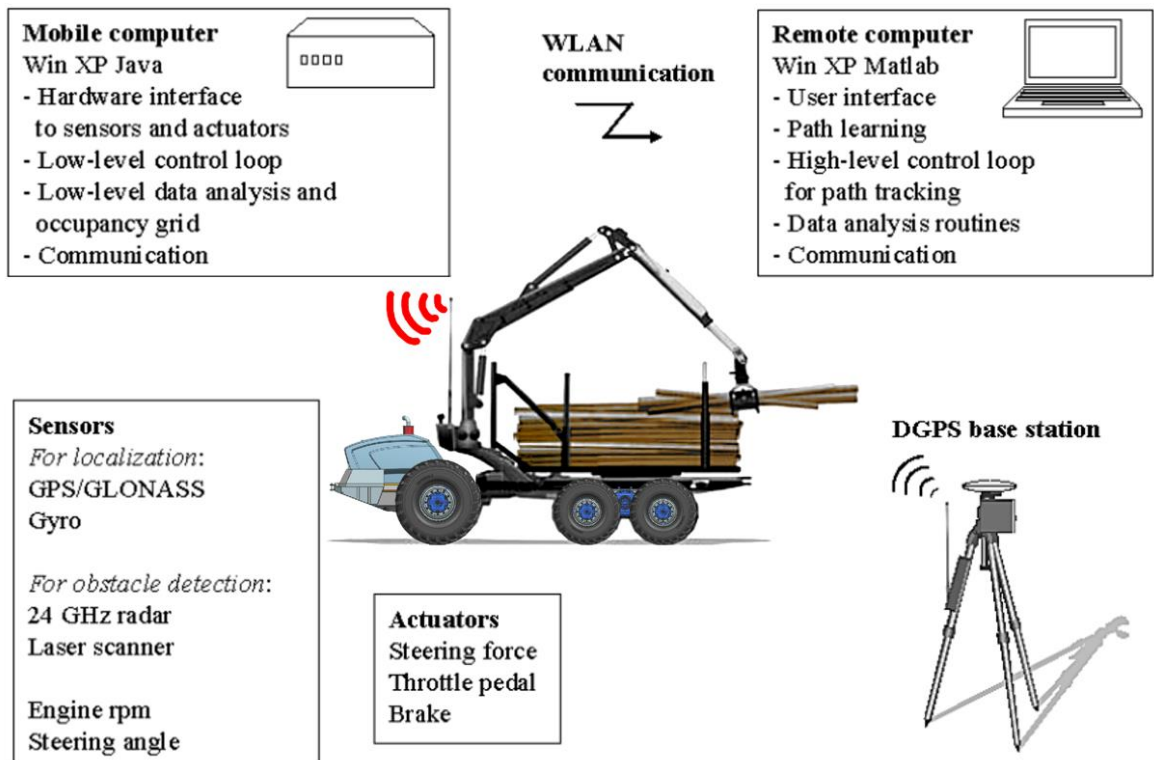


Рис. 1.28. Концепция беспилотной погрузочно-транспортной машины и её системы управления

Система включает в себя два компьютера, совместно выполняющих вычислительные задачи. Вычислительная мощность распределена между двумя компьютерами, соединенными беспроводной локальной сетью (WLAN). Основной компьютер установлен в беспилотной погрузочно-транспортной машине и отвечает за аппаратное взаимодействие и связь с машиной. Он содержит низкоуровневые процедуры для управления скоростью и углом поворота, а также для обработки информации с датчиков. Дополнительный компьютер используется оператором для запуска и контроля автономной работы

погрузочно-транспортной машины. Требуется множество различных датчиков (Раздел 1.1.5.3), в первую очередь, для определения положения машины и наличия каких-либо препятствий на пути.

Основными техническими проблемами, которые необходимо решить для создания автономных навигационных систем, являются более совершенные методы определения местоположения и обнаружения препятствий. Точность определения местоположения ± 1 м считается реалистичной и необходимой для безопасной эксплуатации в лесных условиях. Это необходимая точность для оценки реального положения транспортного средства, поэтому информация о местоположении, поступающая от датчиков, не должна отклоняться более чем на несколько дециметров от истинных значений, чтобы обеспечить безопасное управление лесозаготовительной машиной.

Беспилотные технологии вносят в лесную промышленность много преимуществ. Они повышают эффективность процессов, снижают затраты на рабочую силу и минимизируют риски, связанные с работой в опасных условиях. Беспилотные машины могут работать круглосуточно, что увеличивает общую продуктивность работы.

Отсутствие оператора на борту БПТМ позволит существенно повысить ее подвижность по сравнению с машинами классической компоновки из-за отсутствия психофизиологических ограничений, связанных с нахождением человека на борту, что позволит с учетом запаса прочности элементов конструкции машины без существенных конструктивных изменений увеличить скорость движения БПТМ в порожнем состоянии [37].

Однако у беспилотных технологий есть и свои недостатки. Передовые системы обходятся довольно дорого, что может стать барьером для многих предприятий. К тому же, эффективное использование беспилотных машин требует хорошо развитой инфраструктуры, включая надежные системы связи и навигации.

Кроме того, безопасность является критическим аспектом в использовании беспилотных технологий. Возможные сбои программного обеспечения, ошибки в навигации или системах распознавания объектов могут привести к авариям, что

подчеркивает необходимость строгого контроля и регулярного тестирования этих систем.

На сегодняшний день существуют определенные сложности, связанные с работой технологического оборудования в полностью автономном режиме. В связи с этим актуальным является применение цифровых технологий в развитии беспилотных машин, выполняющих лесозаготовительные операции по трелевке древесины хлыстовым и сортиментным способом заготовки.

Тем не менее, беспилотные технологии продолжают развиваться, и ожидается, что они будут играть все более важную роль в лесной промышленности и других отраслях в ближайшем будущем.

В то же время необходимо продолжать исследования в этой области, чтобы разработать более надежные и доступные системы, которые могут быть широко применены для повышения производительности и безопасности работы.

Внедрение беспилотных лесозаготовительных машин позволяет решить ряд проблем безопасности, связанных с традиционными методами лесозаготовки. Основные из них включают:

1. Снижение риска травматизма и гибели операторов.

Лесозаготовка является одной из самых опасных отраслей, где высока вероятность травм из-за падающих деревьев, работы с тяжелой техникой и сложных условий местности. Беспилотные машины устраняют необходимость присутствия человека в зоне непосредственной опасности.

2. Минимизация человеческого фактора.

Ошибки операторов, усталость или недостаточная квалификация могут приводить к авариям. Автономные системы работают на основе алгоритмов и датчиков, что снижает вероятность ошибок.

3. Защита от неблагоприятных условий труда.

Лесозаготовка часто ведется в сложных погодных условиях, что негативно влияет на здоровье операторов. Беспилотные машины могут работать в таких условиях без риска для человека.

4. Уменьшение воздействия вредных факторов.

Операторы традиционной техники подвергаются воздействию вибрации, шума, выхлопных газов и пыли. Беспилотные машины устраняют эти риски для людей.

5. Повышение точности и контроля.

Автономные системы оснащены датчиками, камерами и системами навигации, что позволяет более точно контролировать процесс валки деревьев и минимизировать риск непреднамеренного повреждения окружающей среды или техники.

6. Улучшение безопасности в труднодоступных местах.

Лесозаготовка часто ведется на сложном рельефе, где высок риск оползней, обвалов или застревания техники. Беспилотные машины могут работать в таких условиях без угрозы для жизни операторов.

7. Снижение риска конфликтов с дикой природой.

В лесах возможны встречи с опасными животными, что создает угрозу для операторов. Беспилотные машины исключают этот риск.

Таким образом, внедрение беспилотных лесозаготовительных машин способствует значительному повышению уровня безопасности в отрасли, защищая жизнь и здоровье людей, а также минимизируя риски для окружающей среды.

1.1.6.2. Определение технологического оборудования применимого к беспилотным трелевочным машинам

Вид и конструкция навесного технологического оборудования, устанавливаемого на колесные и гусеничные трелевочные машины, определяется назначением и технологией тех операций, для которых машина предназначена.

С помощью технологического оборудования, устанавливаемого на колесных и гусеничных машинах, может производиться сбор и трелевка пачки деревьев (хлыстов), погрузка и разгрузка сортиментов и деревьев, обрезка сучьев, раскряжевка и ряд других технологических операций лесозаготовительного процесса.

На колесных и гусеничных трелевочных машинах используется как тросочерное оборудование, самозажимные коники с манипулятором, так и трелевочное оборудование с пачковыми захватами.

Некоторые параметры трелевочного оборудования с пачковыми захватами зарубежных колесных машин приведены в Таблицах 5 - 7.

Таблица 5.

Параметры пачковых захватов скиддеров John Deere серии L

Модель	Тип стрелы	Раскрытие захвата (мм)	Площадь захвата (м ²)
640L	Одинарная стрела	3075	1,00
648L	Двойная стрела	3285	1,24
748L		3365	1,48
848L		3780	1,77
948L		3780	2,00

Таблица 6.

Параметры пачковых захватов 4-колесных скиддеров Tigercat

Модель	Тип захвата	Площадь захвата (м ²)	Максимальное раскрытие (мм)	Дополнительные опции (площадь / раскрытие)
610E	2-цилиндрические, плоские или коробчатые	1,21	3250	1,39 м ² / 3505 мм
620E		1,39	3505	1,58 м ² / 3630 мм
630E		1,58	3630	1,76 м ² / 3710 мм
632E		1,76	3710	1,95 м ² / 3835 мм; 2,14 м ² / 3861 мм

Подробный анализ и оценка технологического оборудования машин с пачковыми захватами даны в работе [138, 161].

Здесь же даются временные показатели срабатывания отдельных элементов технологического оборудования. Проведенный [138, 161] анализ

позволяет облегчить проектированные технологического оборудования с пачковыми захватами.

Индивидуальное лесотехнологическое оборудование трелевочной машины, как правило, подбирается или создается с учетом основных параметров и особенностей той машины, на которой оно будет устанавливаться.

Таблица 7.

Параметры пачковых захватов 6-колесных скиддеров Tigercat

Модель	Тип захвата	Площадь захвата (м ²)	Максимальное раскрытие (мм)	Дополнительные опции (площадь / раскрытие)
615E	2-цилиндровые, плоские или коробчатые	1,58	3630	1,76 м ² / 3710 мм
625E		1,58	3630	1,76 м ² / 3710 мм; 1,95 м ² / 3835 мм
635G		1,95	3810	2,32 м ² / 3835 мм

Правильно подобранное сочетание параметров технологического оборудования и машины при рациональном его размещении позволяет получить высокую производительность, обеспечить удобство управления и обслуживания при высокой маневренности и устойчивости машины.

Технологическое оборудование, устанавливаемое на колесных машинах, может быть индивидуального типа, непосредственно смонтированное на машине, либо универсального типа, временно устанавливаемое на машине на период выполнения определенного вида работ.

Многообразие природно-производственных условий и дифференцированные требования к технологии лесозаготовок вызывают необходимость применять технологическое оборудование на колесных и гусеничных трелевочных машинах различных конструкций, в том числе и гидроманипуляторы.

В зависимости от характера выполняемой работы и конструктивного исполнения гидроманипулятора он может устанавливаться в различных местах базовой машины. Наиболее часто встречается установка гидроманипулятора на машине в средней части рамы. Однако не исключается фронтальная, боковая,

задняя и надкабинная (надкапотная, в случае беспилотного исполнения машины) установка гидроманипулятора.

Гидроманипулятор, устанавливаемый на машине, может являться ее постоянной частью, либо временно устанавливаться на ней на период выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

Трелевочные машины разделяются на чокерные и бесчокерные в зависимости от конструкции технологического оборудования. При работе на лесосеке машину разворачивают и устанавливают таким образом, чтобы обеспечить формирование пачки с минимальными затратами времени и труда.

Чокерные машины подают задним ходом на расстояние 2-4 м от щита до первого дерева или хлыста. При трелевке вершиной вперед продольная ось машины должна совпадать с направлением движения троса лебедки – это облегчает формирование пачки и способствует сохранению подроста [2]. Если деревья трелюют комлем вперед, машину устанавливают под углом 50-60° к направлению подтаскивания, чтобы избежать упирания комлей в пни. После установки оператор опускает щит.

Колесные и гусеничные трелевочные машины с чокерным оборудованием представлены на Рис. 1.29 и 1.30.



а)



б)

Рис. 1.29. Колесные машины с чокерным оборудованием:

а – в порожнем состоянии; б – при трелевке

Формирование пачки чокерным оборудованием включает три этапа: оттаскивание каната, чокеровку деревьев или хлыстов и их подтягивание

лебедкой. Канат разматывают с барабана кратковременным включением лебедки на 2-3 секунды, что облегчает оттаскивание каната. При трелевке вершиной вперед чокеры крепят на расстоянии 0,7-1,2 м от среза, при движении комлем вперед - 0,5-0,7 м от комля. Из-за малой производительности и использования тяжелого человеческого ручного труда чокерное оборудование нецелесообразно применять на беспилотных трелевочных машинах.



а)



б)

Рис. 1.30. Гусеничные машины с чокерным оборудованием:

а – в порожнем состоянии; б – при трелевке

Бесчокерные машины оснащаются гидроманипуляторами или пачковыми захватами. Их технологическое оборудование включает стреловой гидроманипулятор, шарнирный захват, зажимной коник с канатной обвязкой и бульдозерный отвал. Манипулятор позволяет поштучно собирать деревья и формировать пачку в самозажимном конике.

Колесные и гусеничные бесчокерные трелевочные машины с гидроманипулятором и самозажимным коником представлены на Рис. 1.31 и 1.32.

При бесчокерной трелевке машину устанавливают так, чтобы за одну стоянку захватить максимальное количество деревьев. При перемещении машины поваленные деревья раздвигают отвалом или манипулятором. После сбора на первой стоянке хлыстов или деревьев коник закрывают и машина перемещается к следующей стоянке. Возможна сортировка деревьев по породам, размерам и качеству непосредственно в процессе трелевки.



а)



б)

Рис. 1.31. Колесные машины с бесчokerным оборудованием:

а – в порожнем состоянии; б – при трелевке



а)



б)

Рис. 1.32. Гусеничные машины с бесчokerным оборудованием:

а – в порожнем состоянии; б – при трелевке

Бесчokerное оборудование, включающее гидроманипулятор с захватом и самозажимным коником, может быть применено на беспилотных трелевочных машинах, но при этом дистанционное управление технологическим оборудованием будет включать большое количество операций, что приведет к чрезмерной нагрузке удаленного оператора машины и невозможности его параллельной работы на нескольких БПТМ.

Альтернативой являются машины с пачковыми захватами, которые за один прием берут заранее сформированные пачки деревьев. В этом случае пачка удерживается непосредственно в захвате, а не в конике. Такое оборудование включает стрелу в среднем с вылетом порядка 1,72 м, клещевой захват со средней грузоподъемностью около 9 т, лебедку и толкатель. Масса гусеничной машины составляет порядка 15 т, максимальный объем пачки – 10 м³.

Колесные и гусеничные бесчokerные трелевочные машины с клещевым захватом представлены на Рис. 1.33 и 1.34.



а)



б)

Рис. 1.33. Колесные машины с клещевым захватом:

а – в порожнем состоянии; б – при трелевке



а)



б)

Рис. 1.34. Гусеничные машины с клещевым захватом:

а – в порожнем состоянии; б – при трелевке

Бесчokerное оборудование, включающее клещевой захват, наиболее приемлемо для беспилотных трелевочных машин, при этом дистанционное управление оператором технологическим оборудованием будет сведено к минимальному количеству операций: за одну операцию осуществляется сбор заранее сформированной пачки деревьев (хлыстов), далее трелевка в автономном режиме и также за одну операцию производится разгрузка пачки с последующим окучиванием пачки при помощи толкателя. Выполнение минимального количества операций позволит удаленному оператору осуществлять параллельную работу на других БПТМ с аналогичным трелевочным

оборудованием, что повысит производительность труда и уменьшит финансовые затраты, связанные с привлечением дополнительного персонала.

На Рис. 1.35 представлено технологическое оборудование для трелевочных колесных и гусеничных машин с указанием наиболее приемлемого для использования на беспилотной машине.



Рис. 1.35. Наиболее приемлемое для использования на беспилотной машине технологическое оборудование

На основе выполненного анализа применяемого технологического трелевочного оборудования для хлыстовой заготовки древесины можно сделать следующие выводы:

1. Чокерное оборудование не целесообразно применять на беспилотных трелевочных машинах из-за малой производительности и использования тяжелого человеческого ручного труда (чокеровщиков) на делянке.

2. Бесчокерное оборудование, включающее гидроманипулятор с захватом и самозажимным коником, может быть применено на беспилотных трелевочных машинах, но дистанционное управление технологическим оборудованием будет включать большое количество операций, что приведет к чрезмерной нагрузке удаленного оператора машины и невозможности его параллельной работы на другой БПТМ.

3. Бесчokerное оборудование, включающее клещевой захват, наиболее приемлемо для беспилотных трелевочных машин, при этом дистанционное управление оператором технологическим оборудованием будет сведено к минимальному количеству операций: за одну операцию будет осуществляться сбор заранее сформированной пачки деревьев (хлыстов), далее трелевка в автономном режиме и также за одну операцию будет проводится разгрузка пачки с последующим окучиванием пачки при помощи толкателя. Выполнение минимального количества операций позволит удаленному оператору осуществлять параллельную работу на других БПТМ с аналогичным трелевочным оборудованием, что повысит производительность труда и уменьшит финансовые затраты, связанные с привлечением дополнительного персонала.

1.1.6.3. Системы управления движением беспилотными трелевочными машинами и распознавания условий внешней среды

Измерительные, вычислительные и исполнительные устройства входят в состав системы управления движением БПТМ.

К измерительным устройствам относятся датчики, определяющие положение БПТМ во внешней среде, датчики определяющие управляющее воздействие, а также регистрирующие устройства [77, 212].

Следующие системы входят в состав измерительных устройств БПТМ:

- система восприятия окружающей обстановки (сенсорная сеть);
- . система позиционирования БПТМ (комплексная);
- система навигации (локальное и глобальное планирование маршрута);
- система управления агрегатами БПТМ.

1) Система восприятия окружающей обстановки (сенсорная сеть)

Системы восприятия окружающей обстановки делится на внутреннюю и внешнюю сенсорную сеть.

Внешняя сенсорная сеть использует измерительные устройства, находящиеся на машине для распознавания и классификации объектов дорожной сцены, и предоставляет информацию о них для ее сборки. Под условиями эксплуатации понимается следующее: условия погоды; состояние и тип опорной

поверхности; геометрические формы препятствий; деревья; границы волока. В качестве примера на Рис. 1.36 представлены фрагменты распознавания [186].

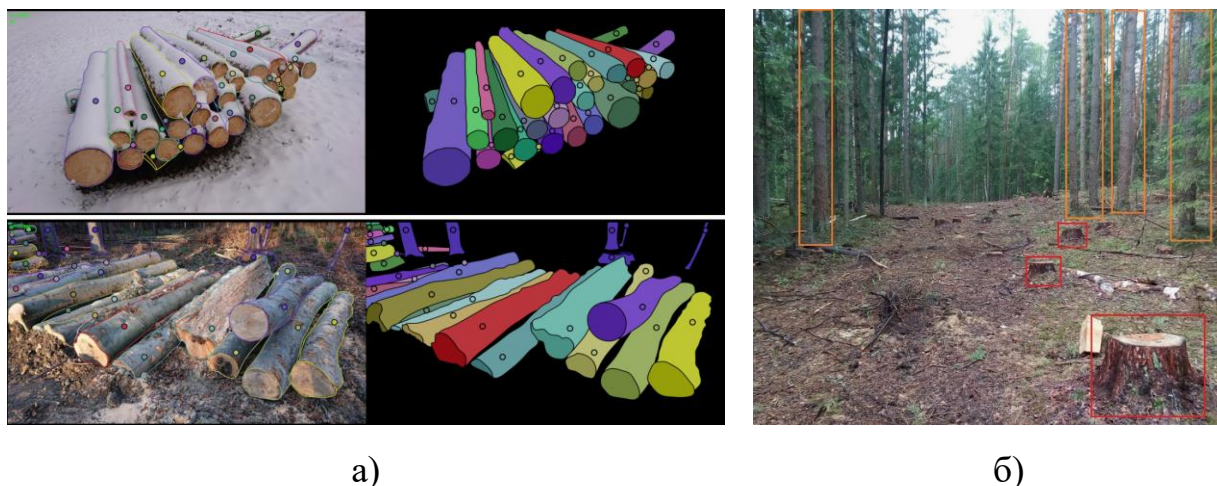


Рис. 1.36. Распознанные объекты на изображении: а – сортименты; б – волок

На сегодняшний день получила распространение следующая измерительная аппаратура внешней сенсорной сети: инфракрасные и оптические датчики (видеокамеры, в том числе стереокамеры); световая (LIDAR/LEDAR – лазерные 3D и 2D-сканеры); радиолокационные средства (радары); ультразвуковая («парктроники»).

Лидар (Light Detection and Ranging) — это технология обнаружения и дальномера, которая использует лучи лазерного света для измерения расстояний и создания точных 3D-карт окружающей среды. Это обеспечивает высокую точность и способность работать в любых погодных условиях, что делает лидары (Рис. 1.37) незаменимым инструментом для беспилотных транспортных средств.

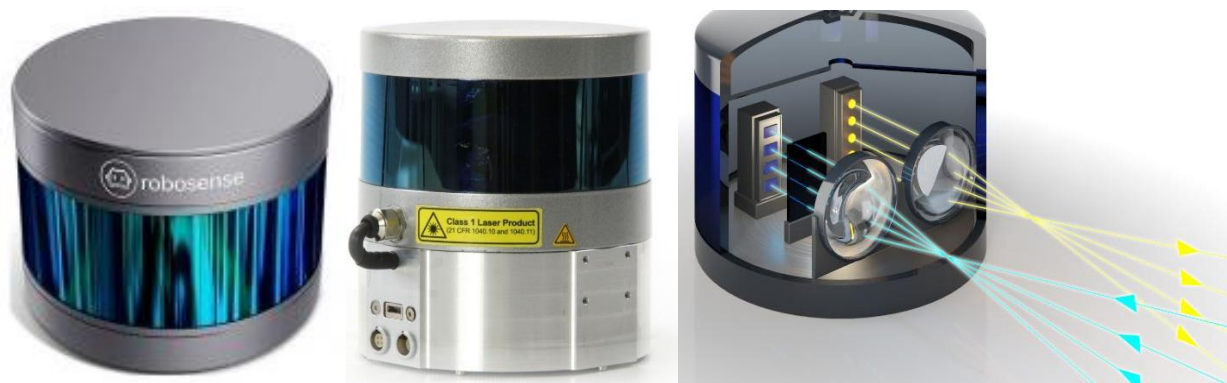


Рис. 1.37. Лидары

Наиболее распространенные лидары для определения дальности измеряют интервал между переданным коротким импульсом (2–10 нс) и обнаружением

отраженного сигнала. Менее распространенные лидары используют метод фазового сдвига при непрерывном лазерном излучении или подсчет одиночных фотонов. Комбинируя измерение дальности с системой позиционирования, можно определить трехмерное местоположение отражающих поверхностей и зарегистрировать их в системе координат. Лазерные импульсы формируют сигналы, преобразуемые в «облако точек», которое отображает пространственную структуру окружающих поверхностей.

В беспилотной трелевочной машине лидары могут быть использованы для обнаружения препятствий, таких как деревья, камни, пни, поваленные деревья и другие объекты, которые могут встретиться на пути машины в лесу. Кроме того, они могут использоваться для определения оптимального пути для машины, избегая, таким образом, возможных препятствий. Пример распознавания деревьев показан на Рис. 1.38.

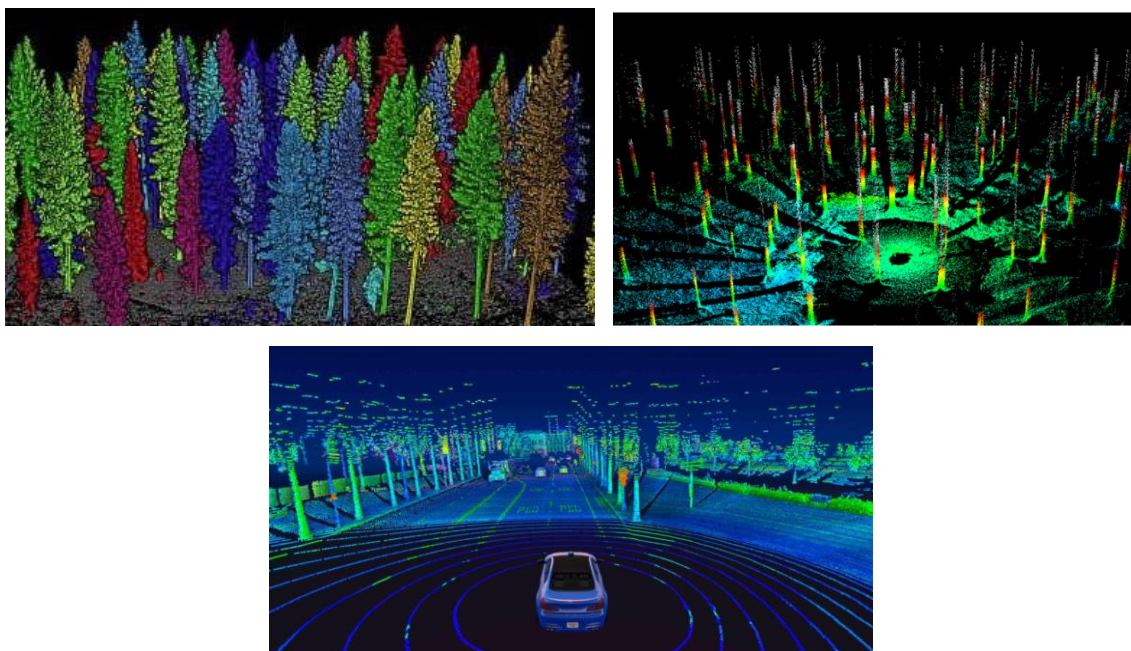


Рис. 1.38. Пример распознавания деревьев лидаром

Среди преимуществ лидаров можно выделить их способность работать в любых условиях освещенности, высокую точность при обнаружении крупных объектов, а также возможность определения скорости движущихся объектов. Однако у этой технологии есть и недостатки, включая высокую стоимость производства, ограниченный радиус действия, зависимость от частоты сканирования, искажение данных при движении сканера или объектов в зоне

обзора, риск получения ложных показаний при взаимодействии со светопреломляющими средами, а также требовательность к местам установки.

Радар (Radio Detection and Ranging) — это технология, использующая радиоволны для обнаружения объектов и измерения их расстояния и скорости. Радары (Рис. 1.39) обладают большой дальностью действия и способностью работать в условиях плохой видимости, например, в тумане или ночью.



Рис. 1.39. Радары

Радар беспилотной трелевочной машины, используемой в лесозаготовительной отрасли, функционирует по схожим с автомобильными аналогами принципам, но с существенной адаптацией под специфические условия эксплуатации. В отличие от дорожных беспилотников, трелевочные машины работают в крайне сложной среде: среди густой растительности, на пересеченной местности с множеством естественных препятствий (деревья, пни, валуны), что требует особого подхода к системе навигации и обнаружения объектов.

Основной принцип работы начинается с генерации радиоволн (обычно в микроволновом или миллиметровом диапазоне), которые излучаются в окружающее пространство. Частота и мощность сигнала специально подобраны для эффективного обнаружения объектов на относительно небольших дистанциях (до 50-100 метров) в условиях плотного леса. Отражаясь от различных препятствий - стволов деревьев, камней, другой техники или даже животных - радиоволны возвращаются к приемнику радара.

Анализ полученных данных включает несколько ключевых аспектов: вычисление расстояния до объектов по времени задержки сигнала, определение скорости движущихся объектов с использованием эффекта Доплера,

установление направления до препятствий посредством антенных решеток. Особую сложность представляет фильтрация полезных сигналов от фонового шума - в лесной среде радар должен четко отличать значимые препятствия от массы отражающих поверхностей (веток, листвы).

Для повышения точности навигации данные радара интегрируются с информацией от других сенсоров - лидаров, оптических камер, систем ГЛОНАСС/GPS и инерциальной навигации. Такой мультисенсорный подход позволяет строить детализированную карту местности в реальном времени. На основе этих данных система управления принимает критические решения: корректирует маршрут движения, инициирует объезд препятствий или экстренную остановку при обнаружении опасности.

Специфика лесозаготовительной техники накладывает особые требования к радарным системам. Они должны сохранять работоспособность в любых погодных условиях (при дожде, снегопаде, тумане), эффективно обнаруживать не только крупные, но и малозаметные объекты (пни, торчащие корни), при этом работая в условиях многочисленных паразитных отражений. В отличие от автомобильных систем, рассчитанных на большие дистанции, трелевочные радары оптимизированы для работы на коротких расстояниях с повышенной точностью.

Несмотря на определенные ограничения (сложность обработки сигналов в густом лесу, относительно низкую точность определения формы объектов по сравнению с лидарами), радарные системы обладают неоспоримыми преимуществами для лесной техники. Они обеспечивают надежное обнаружение препятствий в условиях плохой видимости, работают в реальном времени и демонстрируют высокую устойчивость к внешним воздействиям.

Таким образом, радарная система выступает ключевым компонентом беспилотных трелевочных машин, обеспечивая их безопасную и эффективную работу в самых сложных условиях лесозаготовительных участков. Совместно с другими датчиками и системами автоматизации, она позволяет реализовать полноценное автономное управление специализированной лесной техникой.

Пример распознавания радаром представлен на Рис. 1.40.

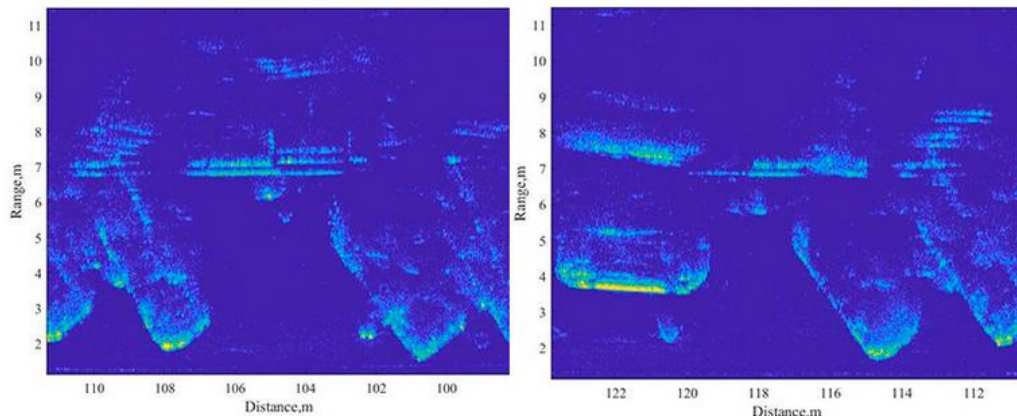


Рис. 1.40. Пример распознавания объектов радаром

Полученные при сканировании данные с лидаров и радаров в виде трехмерного облака точек вокруг БПТМ позволяют использовать более сложные алгоритмы распознавания объектов и их трекинга, чем при использовании 2D-изображения [192].

Видеокамеры являются основным средством обнаружения объектов и ориентации в пространстве для большинства беспилотных транспортных средств. Камеры (Рис. 1.41) способны предоставлять обширную информацию об окружающей среде, включая цвет, форму, текстуру и движение объектов.



Рис. 1.41. Камеры

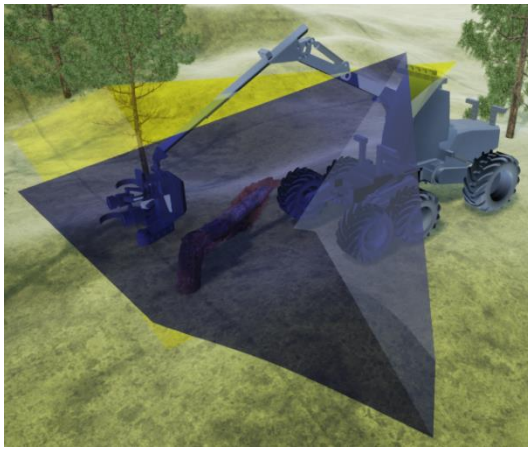
В сочетании с алгоритмами компьютерного зрения, такие как машинное обучение и искусственный интеллект (ИИ), видеокамеры могут обеспечить беспилотной трелевочной машине возможность распознавать объекты, классифицировать их, определять их расстояние и положение относительно машины, также камеры необходимо использовать при дистанционной работе технологическим оборудованием на погрузке и разгрузке трелевочной машины.

В отличие от лидаров, камеры позволяют оператору управлять техникой дистанционно. Одна или несколько камер фиксируют окружающую обстановку, а программное обеспечение анализирует изображение, воссоздавая трехмерное пространство на основе двумерных данных или определяя физические свойства объектов. Для повышения точности часто используются стереокамеры и нейросетевые алгоритмы. К преимуществам камер относятся их относительно низкая стоимость, возможность цветового анализа и более высокое разрешение по сравнению с радарами и лидарами. В то же время их работа зависит от уровня освещенности (при недостатке света требуется дополнительная подсветка), а обработка данных в реальном времени требует значительных вычислительных ресурсов.

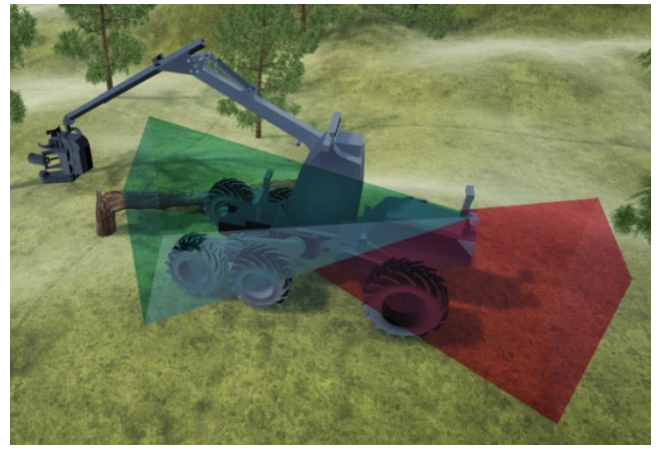
Внешняя сенсорная сеть классифицируется на активную (радары/лидары, видеокамеры с инфракрасной подсветкой для построения карты глубин) и пассивную, неизлучающую (видеокамеры).

Ниже представлен пример расположения измерительных устройств, таких как камеры (Рис. 1.42) и радары (Рис. 1.43) на валочно-сучкорезно-раскряжевочной машине для распознавания и классификации объектов дорожной сцены.

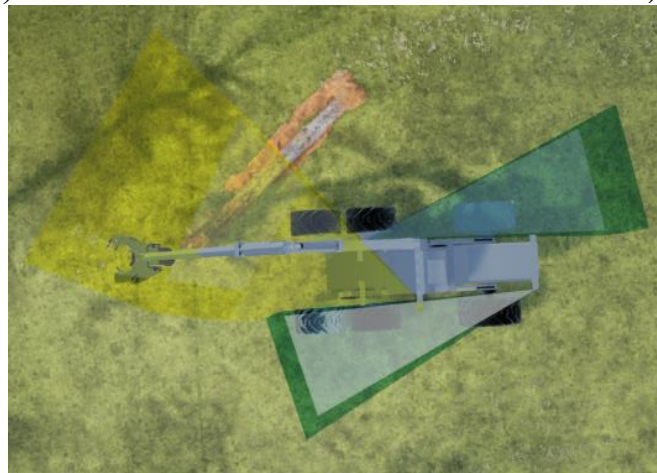
К внешней сенсорной сети БПТМ можно предъявить следующие основные функциональные требования: работа в реальном времени; классификация объектов дорожной сцены; определение вектора скорости движущегося объекта; определение расстояния до объектов и их координат на дорожной сцене; как правило, временные ограничения на реакцию системы определяются максимальной скоростью движения БПТМ; надежность распознавания и точность нанесения объектов на дорожную сцену с заданной вероятностью распознавания и времени наработки; работа во «всепогодных» условиях (днем или ночью, снег, дождь, туман, засвечивание солнцем и фарами другой лесозаготовительной машины и др.); интеграция в общую систему самодиагностики БПТМ.



а)



б)



в)

Рис. 1.42. Зона работы камер, размещенных на валочно-сучкорезно-раскряжевочной машине: а – передних; б – боковых; в – всех (вид в плане)

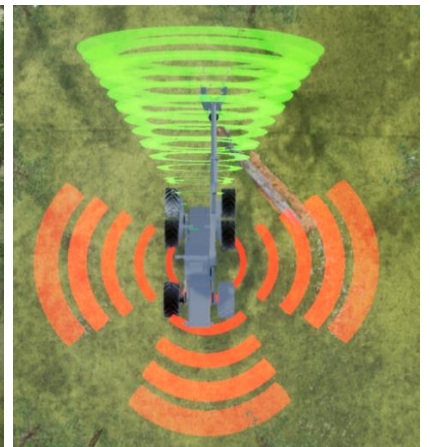
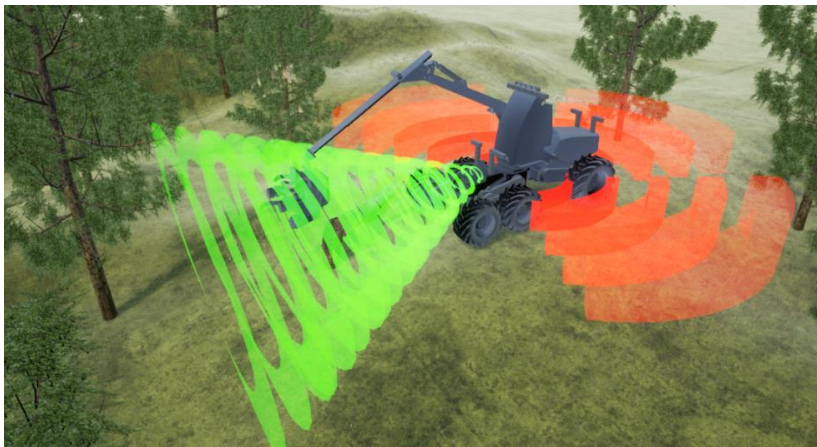


Рис. 1.43. Зона работы радаров 3D, 4D, размещенных на валочно-сучкорезно-раскряжевочной машине

На Рис. 1.44 представлено направление зоны работы измерительных устройств (камер и радаров) валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для распознавания и классификации объектов дорожной сцены

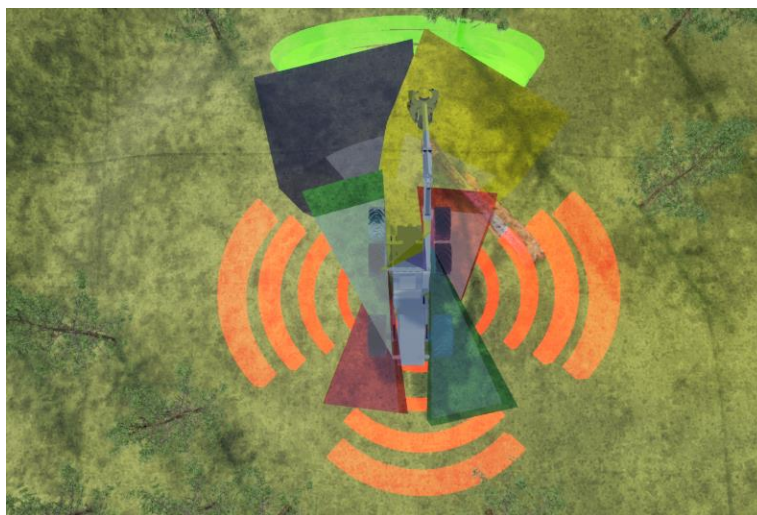


Рис. 1.44. Зона и направление работы камер и радаров, размещенных на валочно-сучкорезно-раскряжевочной машине (вид в плане)

В процессе работы БПТМ измерительные устройства, находящиеся на ней, загрязняются. Очистка измерительных устройств (лидаров, радаров, камер) на БПТМ – это важная задача, так как загрязнение этих устройств может привести к снижению точности данных и, как следствие, к ошибкам в работе. Для обеспечения эффективной очистки можно использовать следующие методы и технологии:

Механическая очистка.

- Щетки и скребки: установка автоматических щеток или скребков рядом с измерительными устройствами (сенсорами). Они могут активироваться по таймеру или при обнаружении загрязнения.
- Вращающиеся щетки: для лидаров и камер можно использовать вращающиеся щетки, которые удаляют грязь, снег и лед.

Пневматическая очистка.

- Сжатый воздух: установка форсунок, подающих сжатый воздух для сдувания пыли, грязи и снега. Это особенно эффективно для лидаров и камер.
- Воздушные завесы: создание воздушного потока вокруг сенсоров, который предотвращает оседание грязи и пыли.

Жидкостная очистка.

- Омыватели: установка систем, аналогичных автомобильным омывателям стекол. Они могут подавать воду или специальные жидкости для очистки камер и других сенсоров.

- Антиобледенительные жидкости: в зимний период можно использовать жидкости, предотвращающие образование льда.

Термическая очистка.

- Подогрев сенсоров: установка нагревательных элементов вокруг сенсоров для предотвращения образования льда и снега.

- Инфракрасные обогреватели: для быстрого удаления наледи и снега.

Ультразвуковая очистка.

- Ультразвуковые излучатели: установка ультразвуковых устройств, которые создают вибрации, удаляющие грязь и лед с поверхности сенсоров.

Пассивная защита.

- Защитные кожухи: установка прозрачных или открывающихся кожухов, которые защищают сенсоры от грязи и снега. Кожухи могут быть оснащены системами очистки (например, щетками или омывателями).

- Наклонные поверхности: конструкция корпуса сенсоров может быть выполнена так, чтобы грязь и снег скатывались под действием силы тяжести.

Автоматизированные системы мониторинга и очистки.

- Датчики загрязнения: установка датчиков, которые определяют уровень загрязнения сенсоров и автоматически запускают процесс очистки.

- Системы самоочистки: интеграция сенсоров в систему, которая самостоятельно активирует очистку при необходимости.

Регулярное техническое обслуживание.

- Ручная очистка: в сложных случаях (например, при сильном обледенении) может потребоваться ручная очистка сенсоров. Это должно быть предусмотрено в графике технического обслуживания.

- Запасные части: наличие сменных элементов (например, защитных стекол) для быстрой замены в случае сильного загрязнения.

Использование материалов с антиадгезионным покрытием.

- Гидрофобные покрытия: нанесение на поверхность сенсоров покрытий, которые отталкивают воду, грязь и снег.

- Олеофобные покрытия: для предотвращения прилипания маслянистых веществ.

Алгоритмы компенсации загрязнения.

- Программная коррекция: разработка алгоритмов, которые позволяют системе распознавать и компенсировать частичное загрязнение сенсоров.

- Резервирование данных: использование данных с нескольких сенсоров для повышения надежности.

В качестве примера реализации для беспилотной трелевочной машины возможно:

а) Лидар: установка вращающихся щеток и системы подачи сжатого воздуха для удаления пыли и снега.

б) Камеры: использование омывателей с подогревом жидкости и гидрофобных покрытий.

в) Радары: защита кожухами с наклонной поверхностью и периодическая очистка сжатым воздухом.

Эти методы могут комбинироваться в зависимости от условий эксплуатации и типа сенсоров. Важно также учитывать энергопотребление и надежность систем очистки, чтобы они не снижали общую эффективность работы беспилотной лесозаготовительной машины.

На Рис. 1.45 представлено сравнение измерительных устройств (камер, лидаров, радаров 3D и 4D, УЗ-датчиков), используемых внешней сенсорной сетью машины для распознавания и классификации объектов дорожной сцены.

	 камера	 лидар	 радар 4D	 радар 3D	 УЗ-датчик
 Хорошо  Средне  Плохо					
1. Погодные условия					
2. Световые условия					
3. Разрешающая способность					
4. Зона Детектирования					
5. Качество детектирования					
6. Цена					

Рис. 1.45 Сравнение измерительных устройств, используемых внешней сенсорной сетью машины

В Таблице 8 приведены технические характеристики и примеры моделей оборудования внешней и внутренней сенсорной сети БПТМ.

Таблица 8.

Характеристики оборудования внешней и внутренней сенсорной сети БПТМ

1. Лидары (LiDAR) используются для построения 3D-карты окружающей среды, обнаружения препятствий и навигации. Тип: вращающийся или твердотельный (Solid-State). Дальность действия: 50–300 метров. Точность: ± 2–5 см. Угол обзора: 360° по горизонтали, 30°–90° по вертикали. Частота сканирования: 10–20 Гц. Количество лучей: 16, 32, 64 или 128 (в зависимости от модели). Примеры моделей: Velodyne VLP-16 (16 лучей, 100 м). Ouster OS1 (64 луча, 120 м). Hesai PandarXT (32 луча, 200 м).	2. Радары (Radar) обеспечивают обнаружение объектов в сложных погодных условиях (дождь, туман, снег). Тип: миллиметровый волновой радар (24 ГГц, 77 ГГц). Дальность действия: до 200–300 метров. Точность: $\pm 0,1$–0,5 м. Угол обзора: 10°–60° (в зависимости от модели). Частота обновления: 10–20 Гц. Примеры моделей: Continental ARS408-21 (77 ГГц, 200 м). Delphi ESR (77 ГГц, 174 м).
3. Камеры используются для визуального восприятия, классификации объектов и работы в условиях хорошей видимости. Тип: RGB, стерео, тепловизоры. Разрешение: 2–12 Мп. Частота кадров: 30–60 FPS. Угол обзора: 60°–120°. Дополнительные функции: HDR (высокий динамический диапазон), ночное видение. Примеры моделей: FLIR Blackfly (RGB, 12 Мп). Basler dart (RGB, 5 Мп). FLIR Tau 2 (тепловизор, 640x512).	4. Ультразвуковые датчики используются для обнаружения близкорасположенных объектов и парковки. Дальность действия: 0,1–5 метров. Точность: ± 1–5 см. Частота работы: 40–50 кГц. Примеры моделей: MaxBotix MB1242 (5 м). Pepperl+Fuchs UC2000-30GM (2 м).

Таблица 8 (продолжение)

5. Инерциальные измерительные блоки (IMU) используются для отслеживания положения и ориентации машины. Тип: 6-осевой (акселерометр + гироскоп) или 9-осевой (акселерометр + гироскоп + магнитометр). Точность: $\pm 0,1^\circ$ (гироскоп), $\pm 0,01$ м/с² (акселерометр). Частота обновления: 100–200 Гц. Примеры моделей: Xsens MTi-630 (9-осевой). Bosch BMI088 (6-осевой).	6. GPS/ГЛОНАСС модули используются для навигации и позиционирования. Точность: ± 1–5 м (стандартный GPS), ± 1–10 см (RTK GPS). Частота обновления: 5–20 Гц. Примеры моделей: u-blox ZED-F9P (RTK GPS, точность до 1 см). Trimble BD990 (высокоточный GNSS).
7. Датчики колес (энкодеры) используются для измерения скорости и пройденного расстояния. Тип: оптические или магнитные. Точность: $\pm 0,1$–1% от пройденного расстояния. Частота обновления: 100–1000 Гц. Примеры моделей: Sick DFS60 (оптический энкодер). AMT102-V (магнитный энкодер).	8. Датчики наклона (инклинометры) используются для контроля наклона машины на пересеченной местности. Тип: 2-осевой или 3-осевой. Точность: $\pm 0,1^\circ$. Частота обновления: 10–100 Гц. Примеры моделей: Murata SCL3300 (3-осевой). TE Connectivity SPT1000 (2-осевой).
9. Тепловизоры используются для работы в условиях плохой видимости (ночь, туман). Разрешение: 320x240, 640x512. Дальность действия: до 1–2 км. Частота кадров: 30–60 Гц. Примеры моделей: FLIR Tau 2 (640x512). Seek Thermal (320x240).	10. Датчики окружающей среды используются для мониторинга условий эксплуатации (температура, влажность, давление). Тип: температурные, влажностные, барометрические. Точность: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (температура), $\pm 2\%$ (влажность). Примеры моделей: Bosch BME280 (температура, влажность, давление). Sensirion SHT31 (температура, влажность).

Ни одна из указанных выше сенсорных систем на сегодняшний день не обеспечивает необходимой надежности распознавания дорожной сцены. В связи с этим при сборке дорожной сцены используют комплексирование данных распознавания: сравнение скорости объектов; сравнение размеров препятствий

и координат; сравнение результатов классификации. Затем присваиваются факторы уверенности распознавания к объектам и их распознанным состояниям, после на дорожную сцену наносятся данные объекты. В системе управления верхнего уровня алгоритмы принятия решений должны учитывать факторы уверенности распознавания объектов дорожной сцены при формировании стратегии движения БПТМ (выбирать траектории объезда объектов, осуществлять снижение скорости вокруг плохо распознанных объектов и с неясным прогнозом их движения назначать зоны «безопасности», и т.д.).

Внутренняя сенсорная сеть отслеживает состояние агрегатов и систем БПТМ. На формирование стратегии поведения БПТМ влияет информация о состоянии систем (к примеру – датчик уровня топлива определяет возможность дальнейшего движения БПТМ без заправки).

На сегодняшний день датчиковая аппаратура внутренней сенсорной сети БПТМ хорошо развита и обычно состоит из датчиков агрегатов БПТМ (датчики оборотов двигателя, угловой скорости вращения колес, состояния тормозной системы, положения движителей относительно продольной оси БПТМ, датчики температурные, степени использования мощности и т.д.).

С точки зрения конструкции БПТМ, дополнительным требованием к данной сенсорной сети является предоставления доступа к результатам измерений для общей системы самодиагностики и системы управления верхнего уровня.

Интегрированная в единую бортовую или облачную информационную базу данных внутренняя сенсорная сеть позволяет решать задачи о прогнозе технического состояния агрегатов и самой БПТМ, техническом обслуживании БПТМ по состоянию, предоставлять альтернативные способы распределения энергии силовой установки системе управления верхнего уровня.

2) Система позиционирования БПТМ

Система базируется на основе сигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

Глобальные навигационные спутниковые системы активно применяются как в составе бортовых программно-аппаратных комплексов современных

транспортных средств, так и в виде приложений и приёмников GPS/ГЛОНАСС на смартфонах водителя/оператора машины. Навигационное оборудование служит для приема и обработки сигналов от спутников с целью получения необходимых данных – определения координат местоположения БПТМ, направления и скорости его движения, пространственной ориентации и других параметров.

Нестабильность сигнала и невысокая точность определения координат является основной проблемой при использовании сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS/ГАЛИЛЕО.

Для повышения точности ГНСС применяются различные методы, среди которых – RTK (Real Time Kinematic). Эта технология позволяет достигать миллиметровой точности в определении координат за счет использования двух взаимосвязанных приемников GPS/ГЛОНАСС. Один из них (базовый) остается неподвижным в точке с известными координатами, а второй (мобильный) перемещается в зоне действия системы (Рис. 1.46) [33].



Рис. 1.46. Базовая станция GPS/ГЛОНАСС

Метод RTK основан на двухчастотных измерениях и передаче фазовых поправок в реальном времени. Предполагается, что при близком расположении приемников и одинаковой высоте погрешности будут схожи. Базовый приемник, зная свои точные координаты, вычисляет поправки и передает их мобильному устройству. В настоящее время во многих странах создаются стационарные

RTK-станции, позволяющие пользователям получать высокоточные данные в зоне их покрытия [33].

Еще один метод повышения точности – дифференциальная ГНСС (DGNSS), также использующая базовый и мобильный приемники. В этом режиме определяются не абсолютные, а относительные координаты мобильного устройства относительно базовой станции. DGNSS обеспечивает точность до десятков сантиметров для кодовых измерений и до нескольких миллиметров – для фазовых. Наибольшую эффективность демонстрируют двухчастотные фазовые приемники, превосходящие одночастотные по точности, дальности и скорости работы [33, 121].

Полученные навигационные данные используются для управления БПТМ как в автономном, так и в дистанционном режиме. В настоящее время автономные системы наиболее распространены в автомобильном транспорте, однако их внедрение в трелевочные машины позволит повысить точность лесозаготовок и снизить их себестоимость.

3) Система навигации (локальное и глобальное планирование маршрута)

Системы навигации БПТМ можно подразделить на локальную и глобальную систему планирования маршрута движения и мест выполнения технологических операций.

Локальная система планирования маршрута движения БПТМ.

На сегодняшний день планирование локальной траектории движения лесозаготовительной машины путем воздействия на органы управления осуществляет оператор, основываясь на полученной визуальным, тактильным и слуховым способом информации о дорожной сцене.

Данную задачу в БПТМ решает система управления верхнего уровня на основе имеющейся дорожной сцены и имеющегося плана разработки лесосеки с указанием мест прокладки трелевочных и магистрального волоков.

Требования, предъявляемые к системе локального планирования маршрута, следующие: оценка/прогноз развития дорожной сцены; работа в реальном времени; построение локальной траектории движения по волоку;

расчет целевых состояний БПТМ на траектории (направление движения, скорость, торможение, движение с определенным радиусом, объезд препятствия; состояние технологического (трелевочного) оборудования и т.д.); максимальной безопасной скоростью движения машины определяются временные ограничения на реакцию системы БПТМ.

Глобальная система планирования маршрута движения БПТМ.

Глобальная система планирования маршрута движения БПТМ включает в себя следующие основные задачи: получение и запуск в работу от оператора БПТМ задания на движение по маршрутам магистрального и трелевочного волоков; построение и выбор маршрута движения БПТМ по волокам делянки, с учетом имеющейся информации о местах с труднопреодолимыми единичными препятствиями (пни, камни и т.д.); планирование и осуществление технологических операций БПТМ в местах сбора и разгрузки пачки деревьев (хлыстов) или сортиментов; отчетные действия о завершении задания движения по маршрутам волоков и событиях, которые возникали в процессе выполнения задания.

Следующие требования предъявляются к системе глобального планирования маршрута: поддержка онлайн-состояния сведений о месте проведения лесозаготовок (сведения о лесосеке и делянках) и маршрутов движения по магистральному и пасечному волокам с учетом лесоводственных требований (наличие бортовой базы данных сведений о лесосеке и делянках, а также маршрутов волоков; обновление из облака бортовой базы данных маршрутов движения по волокам с учетом мест сбора деревьев (хлыстов) или сортиментов); по результатам распознавания проведение обновления баз данных делянки и состояний волоков на ней.

4) Система управления агрегатами БПТМ

Система управления агрегатами БПТМ предназначена для вычисления управляющих воздействий на агрегаты с целью воспроизведения и поддержания локальной траектории движения и целевых состояний БПТМ, в том числе и её технологического оборудования. Система может собирать и хранить информацию об истории состояний агрегатов машины, событиях,

происходивших при движении по волоку, вычислять наиболее оптимальные режимы работы агрегатов машины с целью достижения минимального расхода топлива/заряда, минимального износа деталей агрегатов и т.д.

К системе управления агрегатами БПТМ предъявляются следующие требования: оценка в режиме реального времени состояния агрегатов БПТМ; выдача ограничений по возможности движения БПТМ в систему планирования маршрута движения по волоку (исправность агрегатов и систем, уровень топлива, располагаемая мощность и т.д.); диагностика систем управления агрегатами БПТМ; формирование управляющих сигналов в системы управления агрегатами, а также контроль их исполнения; самодиагностика.

Собственные электронные блоки управления имеет в своем составе большая часть агрегатов БПТМ, к ним относятся: электронная система управления трансмиссией, двигателем, электрооборудованием, тормозами, активного рулевого управления. В связи с указанным выше одним из требований к системе управления агрегатами БПТМ является интеграция в единую систему всех электронных систем управления агрегатами, обеспечивающая сбор, передачу и обработку показаний датчиков агрегатов в единую внутреннюю сенсорную сеть БПТМ.

Построение системы управления агрегатами на базе комплексных математических моделей динамики БПТМ является целесообразным решением при обеспечении последнего требования. Модели динамики БПТМ должны в себе содержать все конструктивные особенности, в том числе облик БПТМ и её отдельных систем управления агрегатами.

На основе выполненного анализа современного технического уровня систем управления движением беспилотными трелевочными машинами и распознавания условий внешней среды можно сделать следующие выводы:

1. Измерительные, вычислительные и исполнительные устройства входят в систему управления движением БПТМ. Скорость реагирования БПТМ на изменение дорожных условий определяет время работы этих устройств.

2. В вычислительную систему управления движением БПТМ необходима интеграция математических моделей динамики БПТМ и её систем управления агрегатами с целью обеспечения требований по функционированию систем управления движением БПТМ.

1.1.7. Коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами

В результате проведённого обзора и анализа технологий (хлыстовой, сортиментной) заготовки древесины и сформированных основных конструктивных особенностей, определяющих функциональные свойства и технические требования для беспилотных трелевочных машин, была обоснована возможность применения и определено место БПТМ в технологии лесозаготовок.

Разработана коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами, позволяющая повысить безопасность, энергоэффективность при выполнении операций трелевки и экономическую эффективность лесозаготовок (Рис. 1.47) [91].

Коллаборативная лесозаготовка (трелевка) древесины предполагает совместную работу нескольких автономных или полуавтономных машин для выполнения задач транспортировки древесины. Такой подход позволяет повысить эффективность, безопасность и экологичность лесозаготовительных процессов. Рассмотрим основные аспекты этой технологии.

На участке лесосеки устанавливаются базовые станции для формирования «коридора» трелевочного волока. Лесосека разделяется на две зоны ответственности управления БПТМ. Первая зона ответственности работы БПТМ находится вблизи верхнего склада. В данной зоне контроль работы БПТМ осуществляет оператор процессора или сортиментовоза/лесопогрузчика при наличии. Вторая зона ответственности работы БПТМ располагается непосредственно на лесозаготовке, контроль и дистанционное управление БПТМ осуществляет оператор валочно-пакетирующей машины (ВПМ). Между этими зонами по волокам БПТМ движется автономно при трелевке и без груза на обратном ходе.

БПТМ оснащается беспилотным летательным аппаратом (БЛА), совместно они используют системы распознавания условий движения и управления движением. БЛА с установленной камерой и лидаром осуществляет сбор данных о предстоящих условиях движения трелевочной машины по волоку и нахождении пачки деревьев (хлыстов). БПТМ со спутниковой системой слежения траектории движения, видеокамерами и радарными на основе предварительно полученных данных с БЛА осуществляет беспилотное движение по волоку. Через систему передачи данных вся отправляемая и получаемая информация должна аккумулироваться на сервере системы, к которому может быть осуществлен удаленный доступ с рабочего места пользователя (оператора ЛМ). Периодически с БЛА осуществляется контроль процесса лесозаготовки.

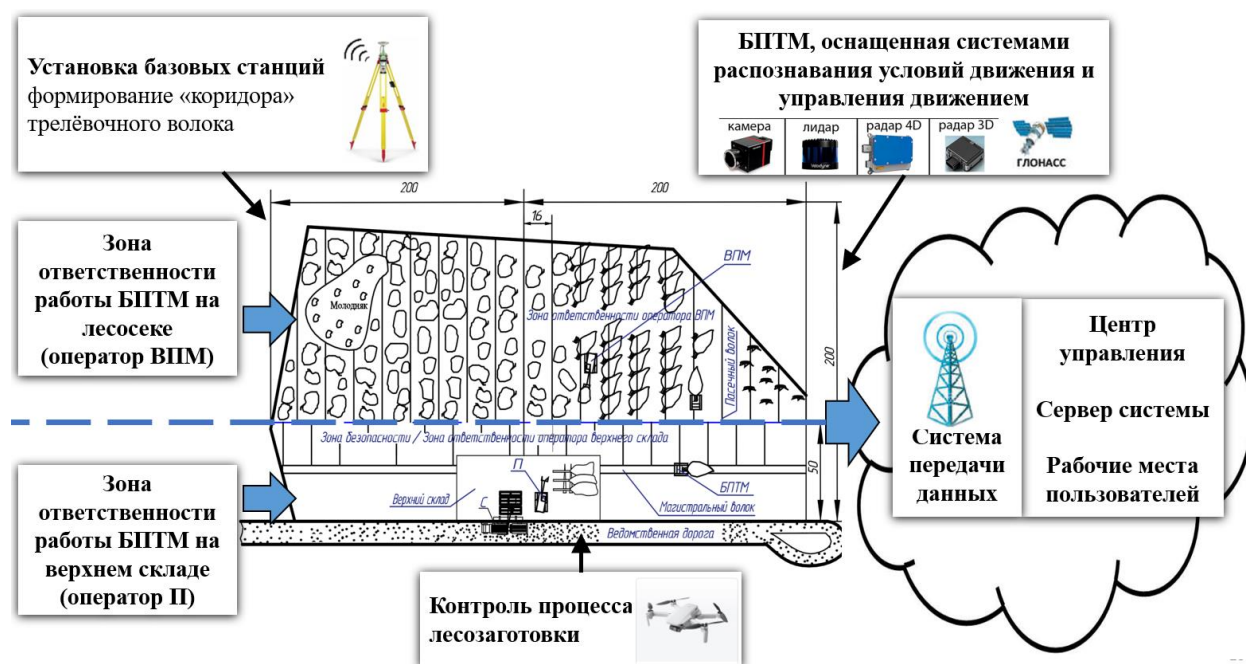


Рис.1.47. Коллаборативная технология хлыстовой заготовки древесины

В периоды трелевки деревьев (хлыстов) на верхний склад и возврата БПТМ в автономном режиме на лесосеке продолжает работать оператор ВПМ, формируя новые пачки деревьев. По возвращению БПТМ за пачкой и готовности к погрузке оператор ВПМ дистанционно осуществляет погрузку с использованием технологического оборудования (пачкового захвата), установленного на БПТМ. После сбора пачки деревьев оператор ВПМ отправляет БПТМ в автономный режим трелевки до верхнего склада, там

осуществляется ее дистанционная разгрузка оператором процессора, лесопогрузчика или сортиментовоза. Далее оператор с верхнего склада отправляет БПТМ в автономном режиме обратно.

Таким образом, сформирован полный цикл работы БПТМ (Рис. 1.48) при коллаборативной заготовке древесины для различных вариантов использования трелевочного оборудования и систем лесозаготовительных машин.

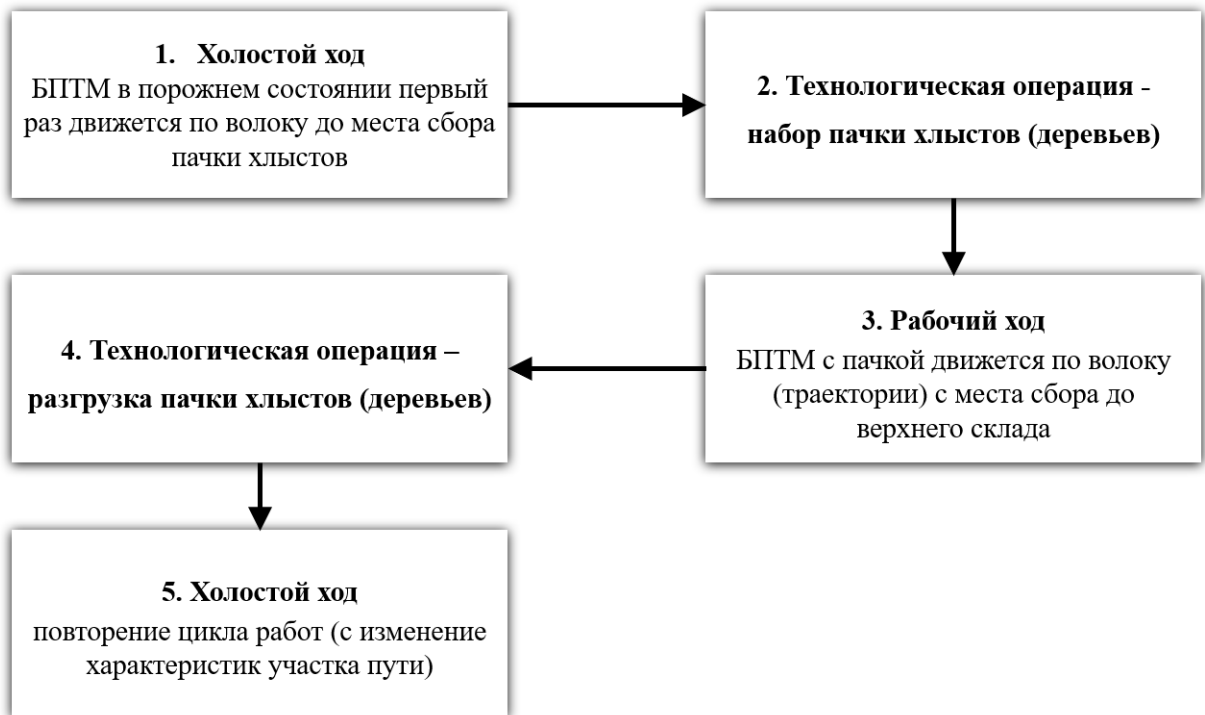


Рис. 1.48. Цикл работы беспилотной трелевочной машины

Основные принципы коллаборативной лесозаготовки представлены ниже.

1) Совместная работа машин:

- беспилотные машины взаимодействуют друг с другом, обмениваясь данными в реальном времени;
- каждая машина выполняет свою задачу (трелевка), но при этом координирует действия с другими.

2) Использование технологий связи:

- машины оснащены системами связи (5G, Wi-Fi, радиоканалы) для обмена информацией;
- данные передаются через облачные платформы или сети.

3) Автономность и адаптивность:

- машины работают на основе алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения, что позволяет им адаптироваться к изменяющимся условиям (рельеф, погода, состояние леса).

4) Централизованное управление:

- оператор или система управления контролирует работу всех машин, координируя их действия и вмешиваясь в случае необходимости.

Ниже приведены основные преимущества коллаборативной технологии лесозаготовки.

1) Повышение производительности:

- совместная работа машин позволяет оптимизировать процессы, сокращая время на выполнение задач;

- уменьшаются простои, так как машины работают синхронно.

2) Снижение затрат:

- автономные машины требуют меньше персонала, что снижает затраты на заработную плату;

- оптимизация маршрутов и расхода топлива уменьшает эксплуатационные расходы.

3) Улучшение безопасности:

- отсутствие операторов в зоне непосредственной работы машин снижает риск травматизма.

4) Минимизация воздействия на окружающую среду:

- точная навигация и планирование маршрутов позволяют снизить повреждение почвы и растительности;

- оптимизация процессов снижает выбросы CO₂.

5) Гибкость и масштабируемость:

- система может быть легко масштабирована для работы на больших или малых участках;

- возможность интеграции новых машин и технологий.

Ниже приведены технологии, используемые при коллаборативной лесозаготовке.

1) Системы навигации и позиционирования:

- GPS, ГЛОНАСС, RTK (кинематика в реальном времени) для точного определения местоположения;

- лидары, радары и камеры для построения карты местности, обнаружения препятствий и мест нахождения сортиментов и пачек деревьев/хлыстов на делянке.

2) Искусственный интеллект и машинное обучение:

- алгоритмы для планирования маршрутов, распознавания деревьев и оптимизации процессов;

- системы прогнозирования для адаптации к изменяющимся условиям.

3) Сенсоры и IoT (Интернет вещей):

- датчики для мониторинга состояния машин, нагрузки, топлива и других параметров;

- IoT-платформы для сбора и анализа данных.

4) Облачные технологии:

- хранение и обработка данных в облаке для анализа и оптимизации процессов;

- удаленное управление и мониторинг.

Ниже представлены перспективы развития.

Коллаборативная лесозаготовка с использованием беспилотных машин – это перспективное направление, которое будет развиваться с учетом совершенствования технологий ИИ, робототехники и связи. В будущем такие системы могут стать стандартом в отрасли, обеспечивая высокую эффективность, безопасность и экологичность.

1.1.8. Формирование облика (схемных решений) колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин для хлыстовой и сортиментной технологии лесозаготовок

1.1.8.1. Определение конструктивно-компоновочных решений беспилотных трелевочных машин

Применение беспилотных дистанционно управляемых лесных машин будет широко использоваться для решения различных задач лесного комплекса, где

работа для человека может представлять опасность [26, 104]. Одним из перспективных и возможных к реализации направлений применения беспилотных транспортно-технологических средств лесного комплекса является организация работы на трелевке древесины по заданным маршрутам на местности путем применения коллаборативной технологии заготовки древесины [91, 92].

В современных лесных технологиях задачи лесного хозяйства и технологии лесозаготовок тесно связаны и обычно решаются вместе в рамках задачи одновременной локализации беспилотных дистанционно управляемых лесных машин [91]. Интеллектуальная система управления лесозаготовительной машиной и её технологическим оборудованием для выполнения операций трелёвки должна решать несколько практических задач: построение рационального маршрута передвижения машины по лесосеке в порожнем состоянии и с пачкой деревьев в полупогруженном состоянии (построение схемы волоков), выбор мест стоянок машины для выполнения операций по сбору деревьев (хлыстов), выбор деревьев для сбора по породам в случае необходимости, точного и быстрого наведения манипулятора (пачкового захвата) на собираемое дерево (пачку деревьев) и последующая трелевка по заданной траектории движения. Решение данных задач возможно при оперативном получении необходимой информации о расположении деревьев на лесосеке и о рельефе местности при помощи космического и воздушного зондирования лесного участка и установленных на машине наружных лидаров, радаров и камер наблюдения с определением расстояния до объектов (Раздел 1.1.5) [185, 202, 203, 208]. Прокладка маршрута передвижения машины производится на основании данных о местном изменении плотности древостоя, уклона местности, расположения неразрабатываемых участков (ручьев, болот, территорий молодняков и др.).

Производственными критериями работы интеллектуальной системы являются минимизация передвижения лесозаготовительных машин, сокращения проходов техники по участкам лесосеки с низкой несущей способностью грунта. Выбор мест стоянок беспилотных трелевочных машин для выполнения

технологических операций по сбору деревьев и их последующей трелёвки позволяет сократить время работы технологическим оборудованием, снизить повреждаемость деревьев. В совокупности, улучшение значений данных показателей позволяет сократить время цикла работы машины, повысить её производительность и увеличить энергоэффективность.

В ходе анализа существующих конструктивно-компоновочных решений колесных и гусеничных трелевочных машин с учетом технологического оборудования для проведения дальнейших исследований были определены следующие схемы исполнений в зависимости от технологии лесозаготовки:

для технологии заготовки леса хлыстами:

- гусеничные беспилотные трелевочные машины с пачковым захватом и самозажимным коником с манипулятором;
- колесная беспилотная трелевочная машина с пачковым захватом.

для технологии заготовки леса сортиментами:

- гусеничная и колесная беспилотная погрузочно-транспортная машина с кониковой площадкой и манипулятором.

Существенное влияние на формирование облика беспилотных трелевочных машин оказывает рейсовая нагрузка. Она устанавливает основные значимые параметры БПТМ, такие как масса, мощность, скорость движения. Выбор движителя БПТМ определяется требуемой проходимостью на участке конкретной лесосеки. Выбор типа трелевочного оборудования определяет место БПТМ на лесозаготовках и формирует время на выполнение технологических операций [114, 133,]. Выбор типа шасси позволит определить облик БПТМ и размещение технологического оборудования [150]. Движение БПТМ по криволинейным траекториям определяет необходимость применения бесступенчатых трансмиссий.

На Рис. 1.49 представлены факторы, влияющие на формирование облика колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин.

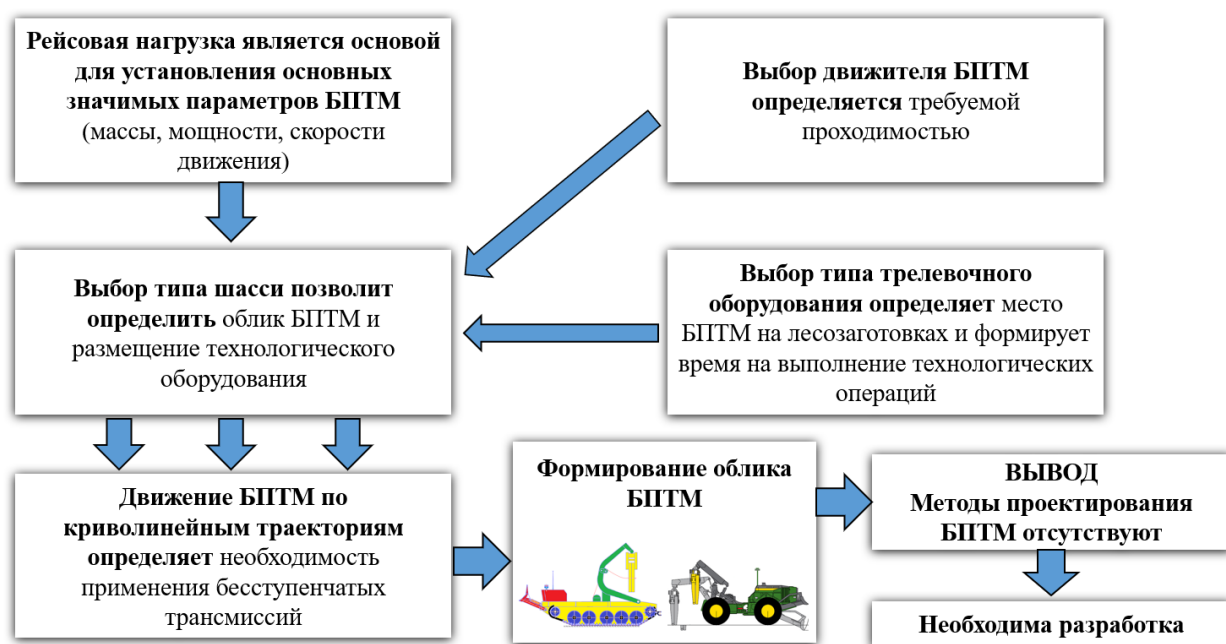


Рис. 1.49. Факторы, оказывающие влияние на формирование облика БПТМ

1.1.8.2. Выбор ходовой системы гусеничного движителя беспилотной трелевочной машины

Гусеничные лесозаготовительные машины могут быть оборудованы рычажно-балансирной или торсионной подвеской с 4, 5 или 6 опорными катками на борт. Чтобы нагрузка на катки распределялась равномерно при трелевке хлыстов или деревьев в полупогруженном состоянии, конструкция узлов беспилотных трелевочных машин разработана с учетом этих требований.

Силовая установка размещается в передней части БПТМ, а технологическое оборудование – в задней.

Рассмотрим силы реакций, возникающих в местах крепления опорных катков к балансирам, а также балансиров к рычагам ходовой системы динамической модели беспилотной трелевочной машины (Глава 2) следующих компоновок:

- шестикатковая БПТМ с пачковым захватом;
- четырёхкатковая БПТМ с самозажимным коником и манипулятором;
- четырёхкатковая БПТМ с пачковым захватом.

Для проведения расчётов рассматриваем два случая: определение реакций опор у ненагруженной (Рис. 1.50, 1.56, 1.62) машины в статическом положении на ровной поверхности и аналогичный расчёт для машины под нагрузкой (Рис.

1.53, 1.59, 1.65). Отсчет кареток по бортам машины осуществляется от ведущего колеса (т.е. каретка №1 находится рядом с ведущим колесом). В каретке два опорных катка – передний (front) и задний (rear). Задний опорный каток каждой каретки располагается ближе к ведущему колесу.

Вариант 1а. Определение реакций опор у ненагруженной шестикатковой БПТМ с пачковым захватом в статическом положении (Рис. 1.50).

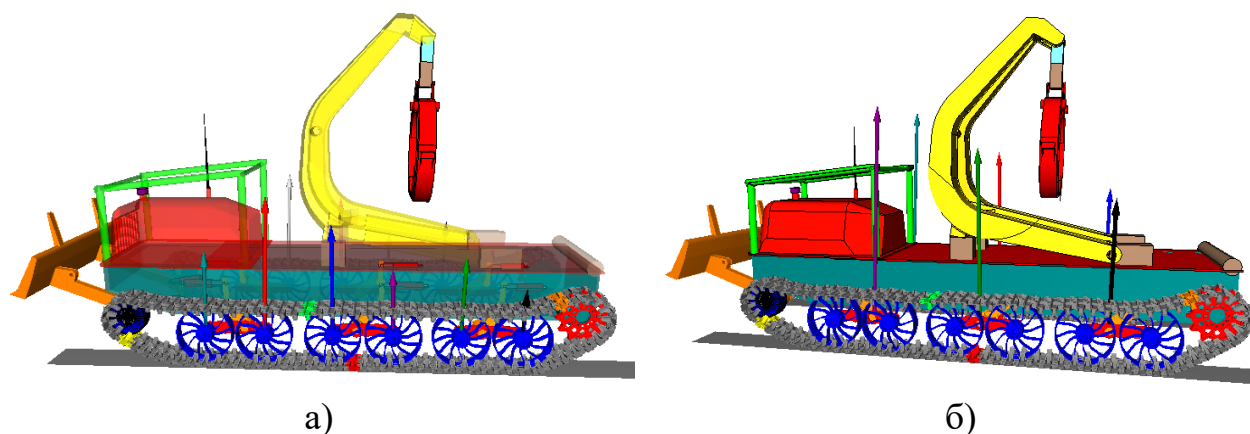


Рис. 1.50. Порожняя шестикатковая БПТМ с пачковым захватом: а – силы реакций в шарнире опорных катков (Рис. 1.51); б – силы реакций в шарнире балансира и рычага (Рис. 1.52)

У ненагруженной шестикатковой БПТМ с пачковым захватом в ходе моделирования были получены силы реакций, действующие в шарнире опорных катков (Рис. 1.51) и местах установки балансиров на рычаги ходовой системы (Рис. 1.52).

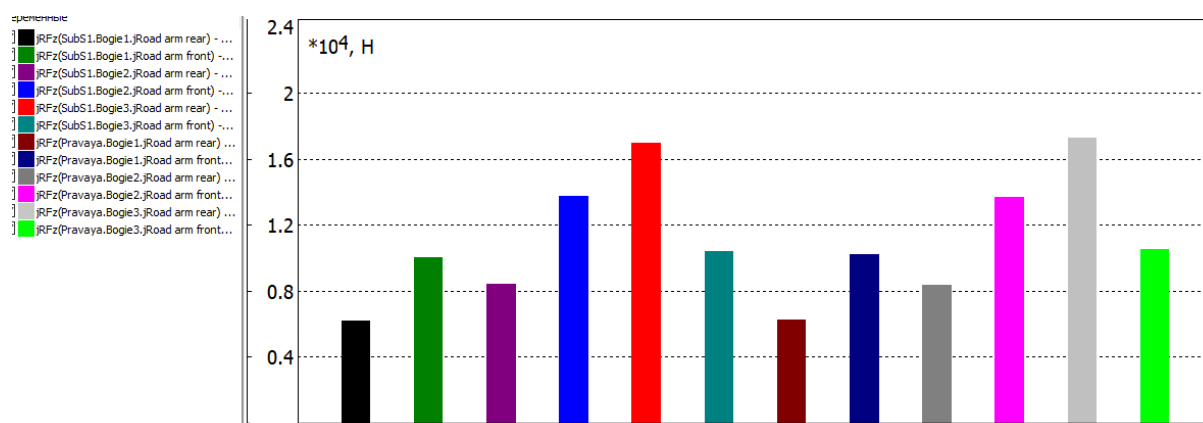


Рис. 1.51. Сила реакций в шарнире опорных катков порожней шестикатковой БПТМ с пачковым захватом

Вариант 16. Определение реакций опор у нагруженной шестикатковой БПТМ с пачковым захватом в статическом положении (Рис. 1.53).

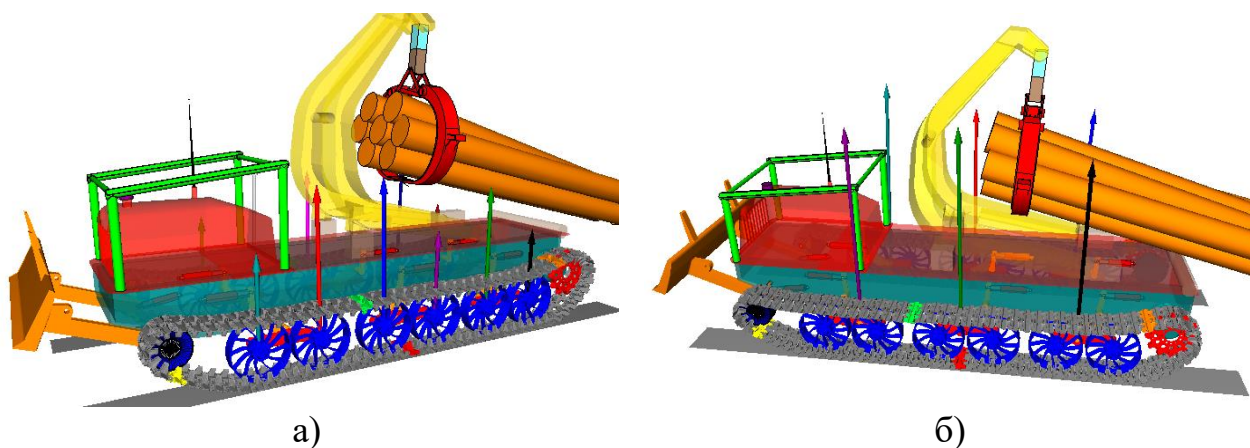


Рис. 1.53. Гружёная шестикатковая БПТМ с пачковым захватом: а – силы реакций в шарнире опорных катков (Рис. 1.54); б – силы реакций в шарнире балансира и рычага (Рис. 1.55)

У нагруженной шестикатковой БПТМ с пачковым захватом в ходе моделирования были получены силы реакций, действующие в шарнире опорных катков и местах установки балансиров на рычаги ходовой системы (Рис. 1.54, 1.55).

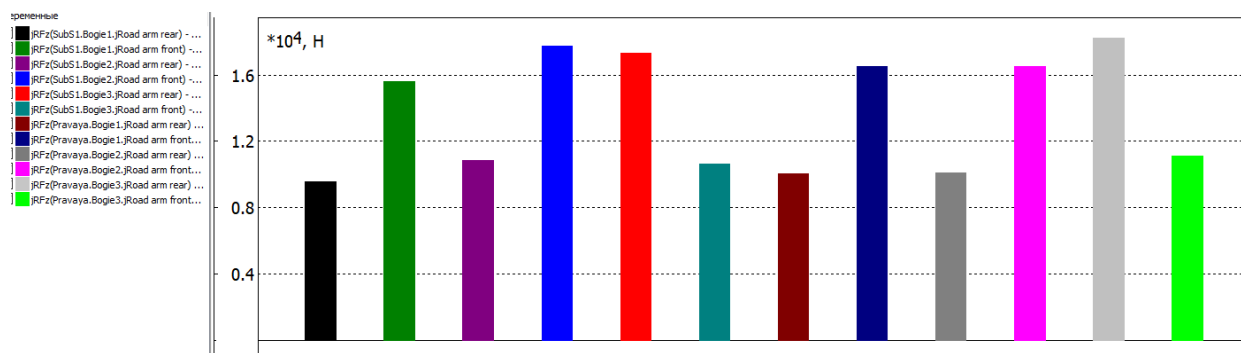


Рис. 1.54. Сила реакций в шарнире опорных катков грузёной шестикатковой БПТМ с пачковым захватом

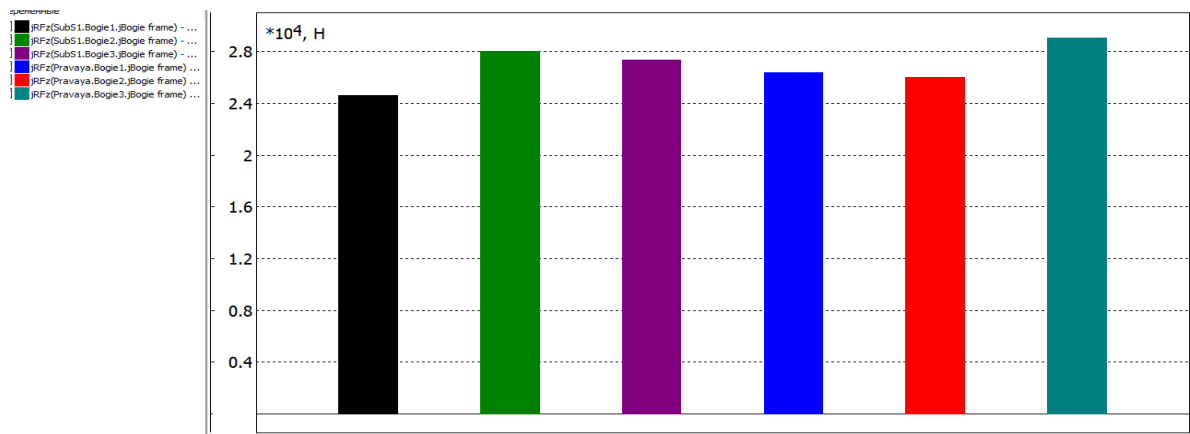


Рис. 1.55. Сила реакций в шарнире балансира и рычага грузёной шестикатковой БПТМ с пачковым захватом

Вариант 2а. Определение реакций опор у ненагруженной четырёхкатковой БПТМ с самозажимным коником и манипулятором в статическом положении (Рис. 1.56).

У ненагруженной четырёхкатковой БПТМ с самозажимным коником и манипулятором в ходе моделирования были получены силы реакций, действующие в шарнире опорных катков (Рис. 1.57) и местах установки балансиров на рычаги ходовой системы (Рис. 1.58).

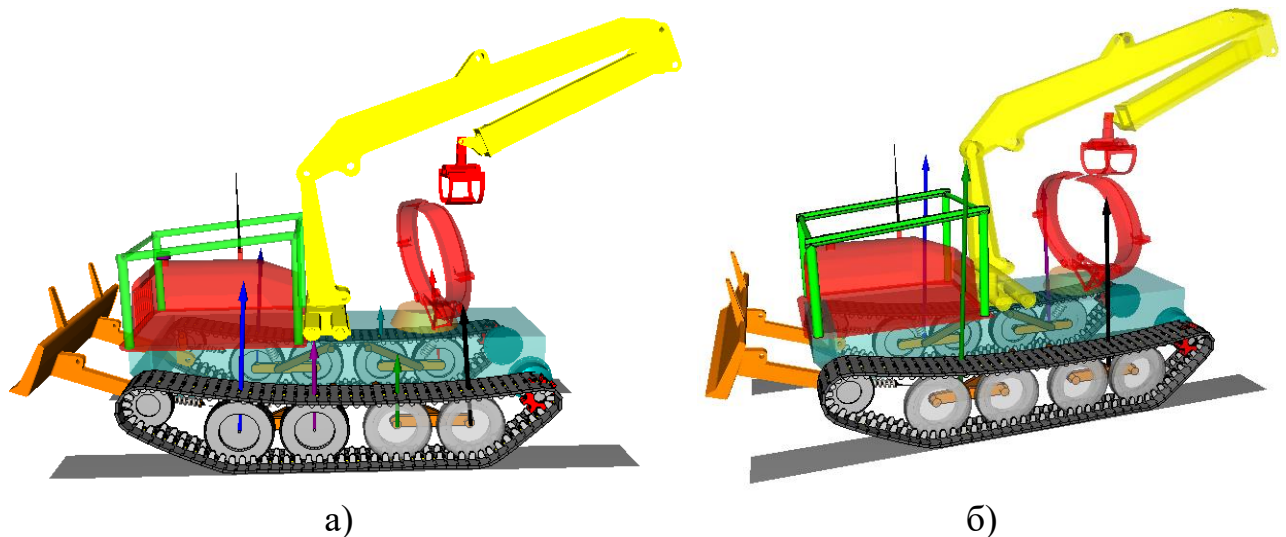


Рис. 1.56. Порожняя четырёхкатковая БПТМ с самозажимным коником и манипулятором: а – силы реакций в шарнире опорных катков (Рис. 1.57); б – силы реакций в шарнире балансира и рычага (Рис. 1.58)

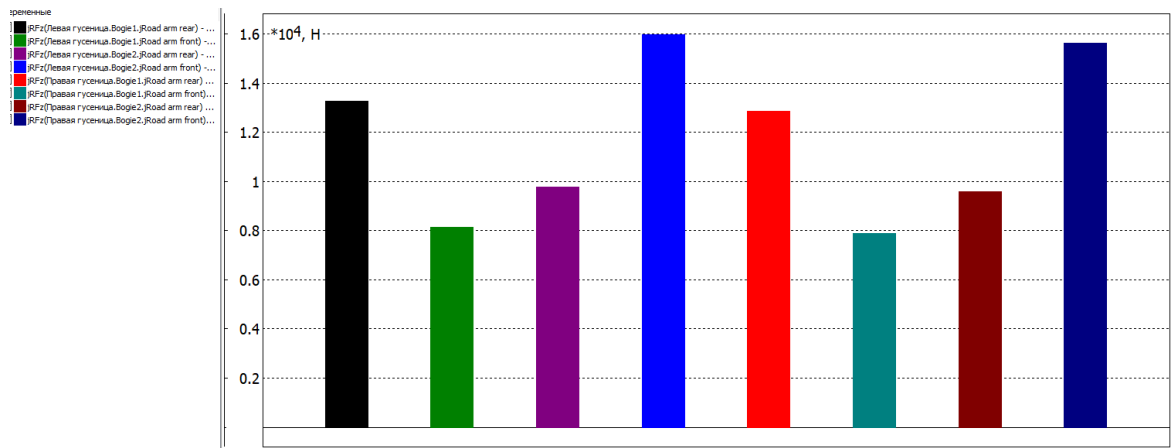


Рис. 1.57. Сила реакций в шарнире опорных катков порожней четырёхкатковой БПТМ с самозажимным коником и манипулятором

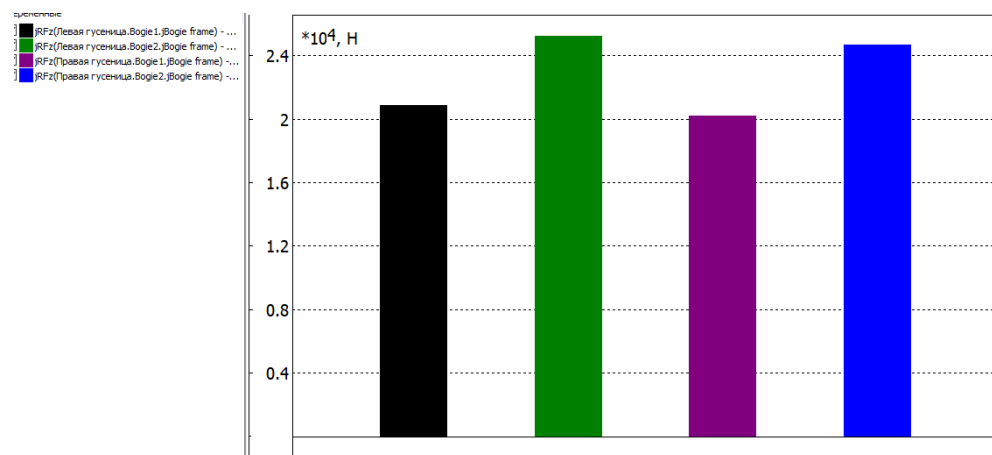


Рис. 1.58. Сила реакций в шарнире балансира и рычага порожней четырёхкатковой БПТМ с самозажимным коником и манипулятором

Вариант 2б. Определение реакций опор у нагруженной четырёхкатковой БПТМ с коником и манипулятором в статическом положении (Рис. 1.59).

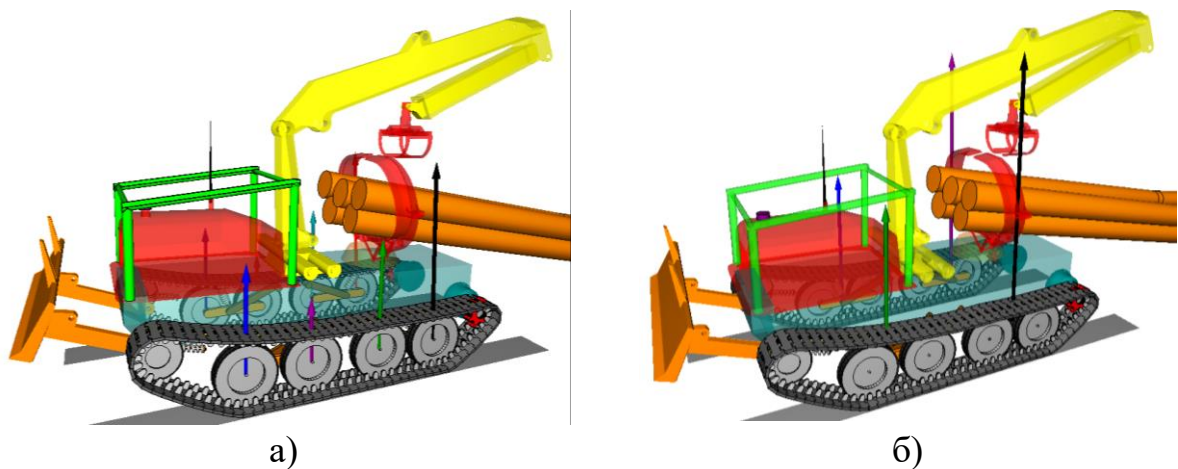


Рис. 1.59. Грузёная четырёхкатковая БПТМ с самозажимным коником и манипулятором: а – силы реакций в шарнире опорных катков (Рис. 1.60); б – силы реакций в шарнире балансира и рычага (Рис. 1.61)

У нагруженной четырёхкатковой БПТМ с самозажимным коником и манипулятором в ходе моделирования были получены силы реакций, действующие в шарнире опорных катков (Рис. 1.60) и местах установки балансиров на рычаги ходовой системы (Рис. 1.61).

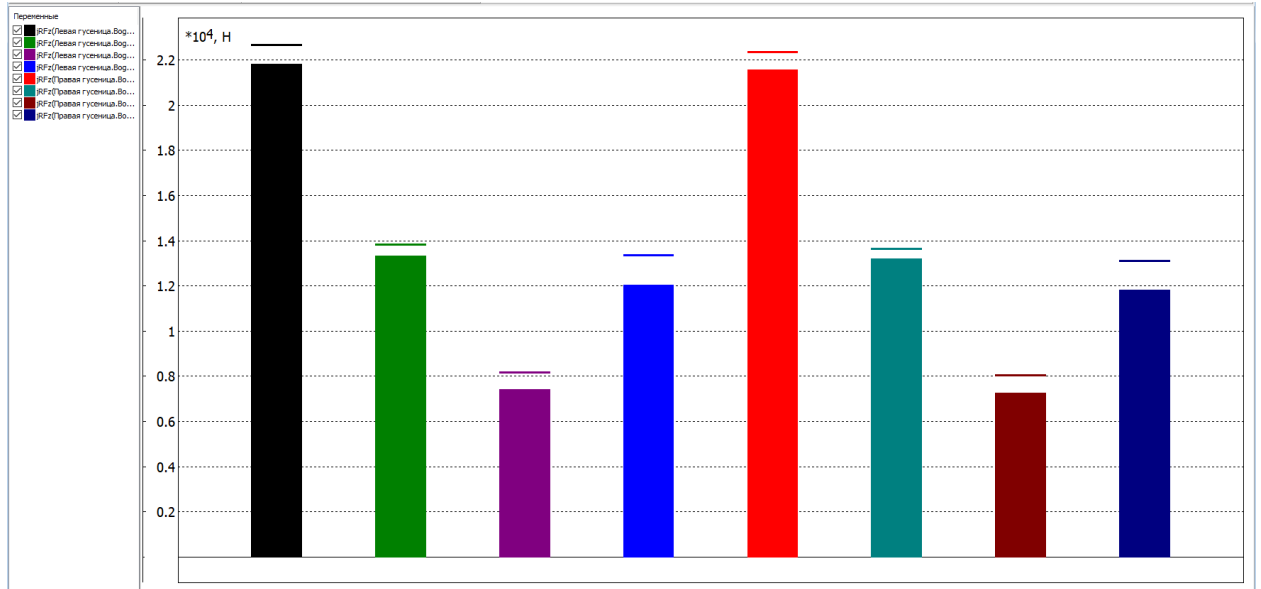


Рис. 1.60. Сила реакций в шарнире опорных катков гружёной четырёхкатковой БПТМ с самозажимным коником и манипулятором

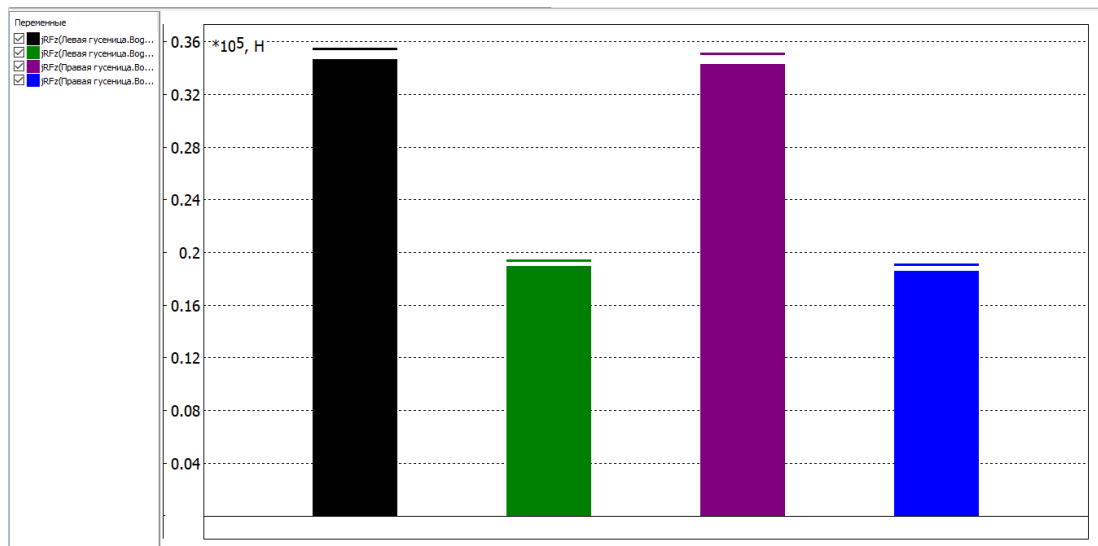


Рис. 1.61. Сила реакций в шарнире балансира и рычага гружёной четырёхкатковой БПТМ с самозажимным коником и манипулятором

Вариант 3а. Определение реакций опор у ненагруженной четырёхкатковой БПТМ с пачковым захватом в статическом положении (Рис. 1.62).

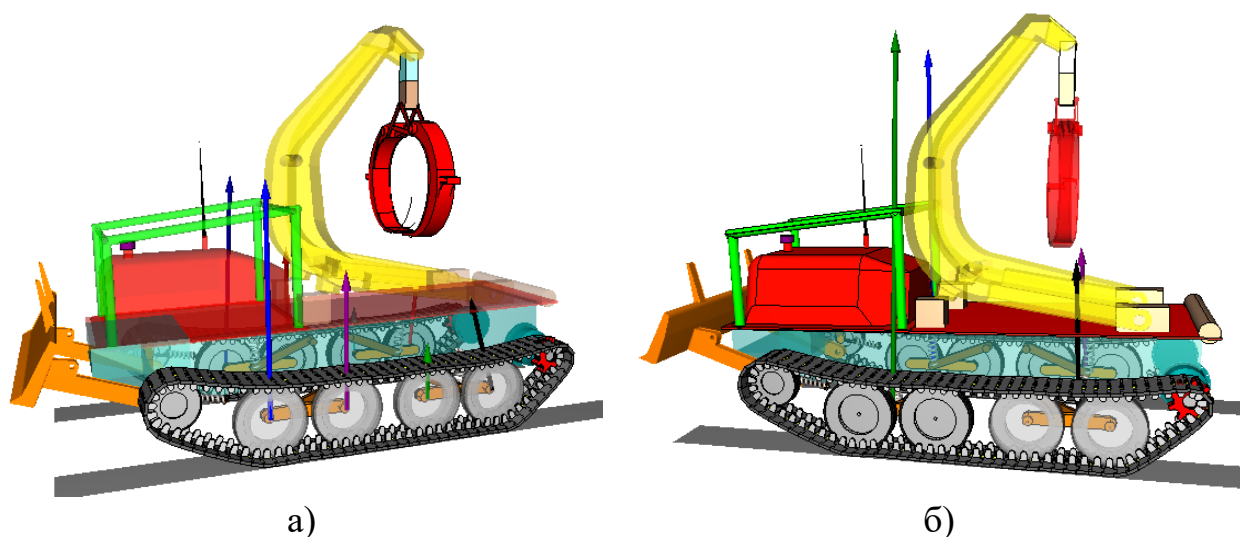


Рис. 1.62. Порожня четырёхкатковая БПТМ с пачковым захватом: а – силы реакций в шарнире опорных катков (Рис. 1.63); б – силы реакций в шарнире балансира и рычага (Рис. 1.64)

У ненагруженной четырёхкатковой БПТМ с пачковым захватом в ходе моделирования были получены силы реакций, действующие в шарнире опорных катков (Рис. 1.63) и местах установки балансиров на рычаги ходовой системы (Рис. 1.64).

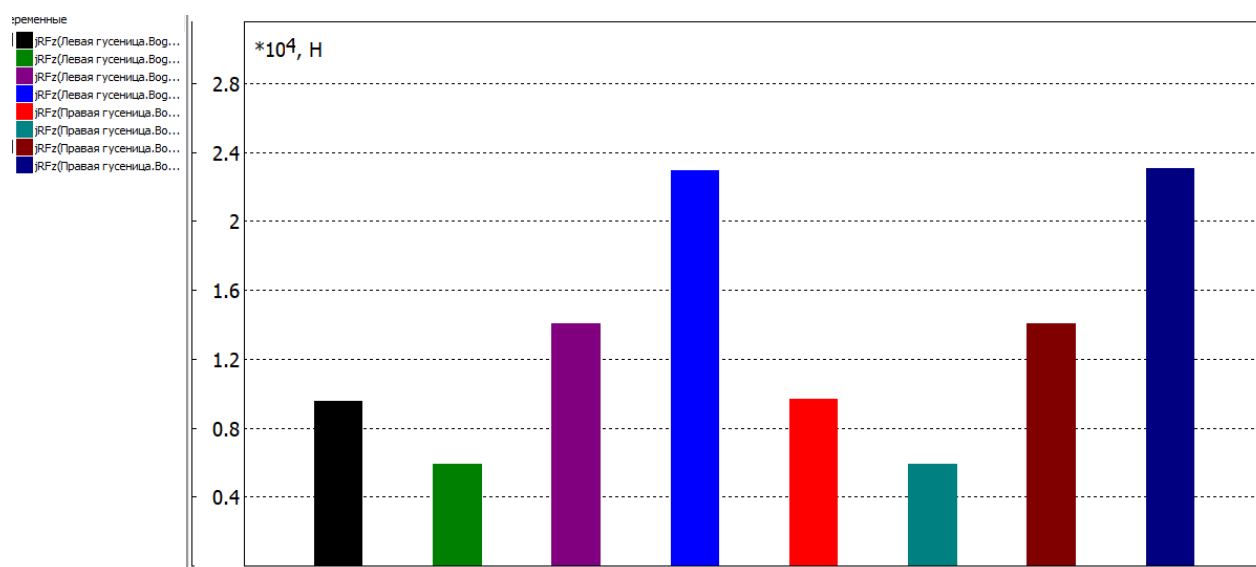


Рис. 1.63. Сила реакций в шарнире опорных катков порожней четырёхкатковой БПТМ с пачковым захватом

Вариант 3б. Определение реакций опор у нагруженной четырёхкатковой БПТМ с пачковым захватом в статическом положении (Рис. 1.65).

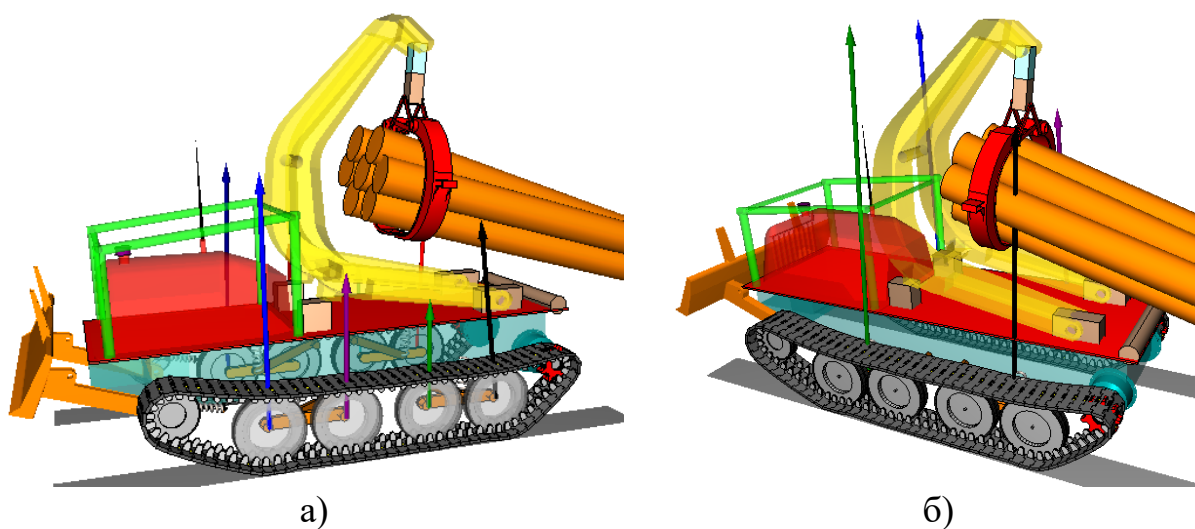


Рис. 1.65. Грузёная четырёхкатковая БПТМ с пачковым захватом: а – силы реакций в шарнире опорных катков (Рис. 1.66); б – силы реакций в шарнире балансира и рычага (Рис. 1.67)

У нагруженной четырёхкатковой БПТМ с пачковым захватом в ходе моделирования были получены силы реакций, действующие в шарнире опорных катков (Рис. 1.66) и местах установки балансиров на рычаги ходовой системы (Рис. 1.67).

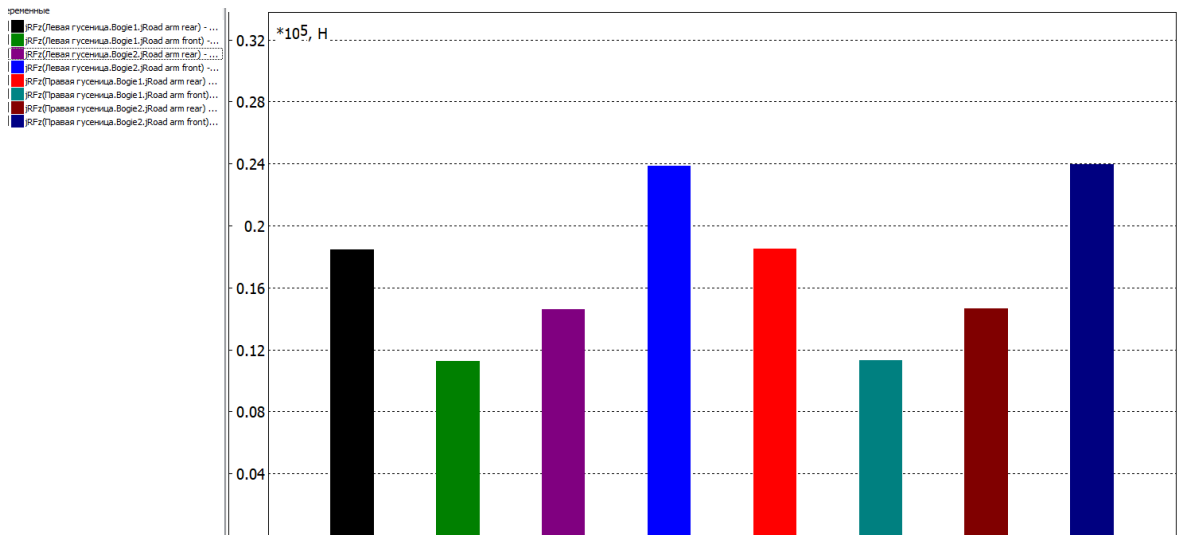


Рис. 1.66. Сила реакций в шарнире опорных катков грузёной четырёхкатковой БПТМ с пачковым захватом

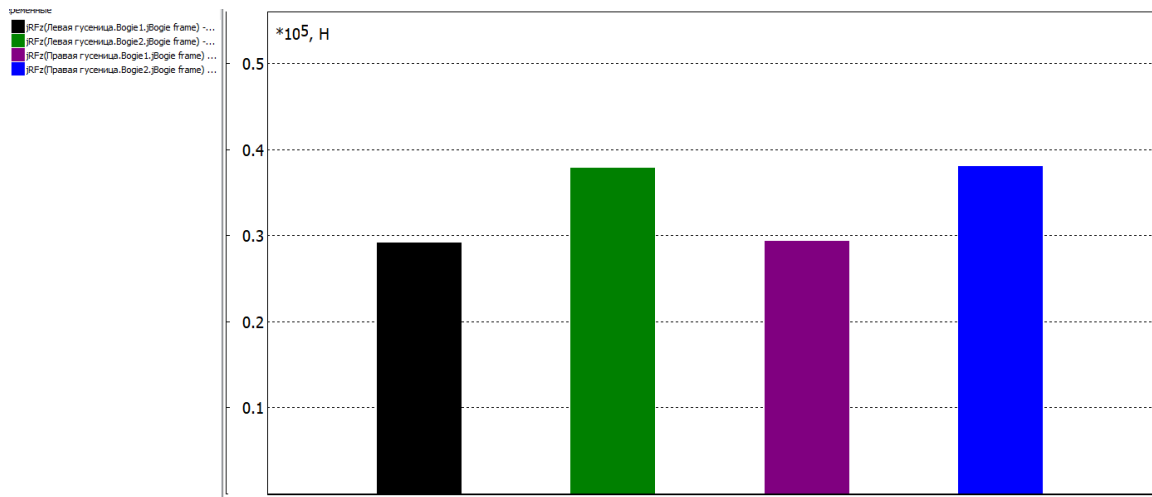


Рис. 1.67. Сила реакций в шарнире балансира и рычага грузёной четырёхкатковой БПТМ с пачковым захватом

Шестикатковая БПТМ демонстрирует более равномерное распределение нагрузки по сравнению с четырёхкатковой, что может быть преимуществом при работе с пачками большего объема.

Четырёхкатковая БПТМ с самозажимным коником и манипулятором, а также с пачковым захватом, показала эффективность в условиях частичной нагрузки, но требует тщательного расчёта прочности узлов при полной загрузке.

При проектировании четырёхкатковых БПТМ необходимо уделять особое внимание усилению шарниров и балансиров для предотвращения появления чрезмерных нагрузок.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию конструкции подвески для снижения пиковых нагрузок в критических узлах.

1.1.8.3. Схемные решения колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин

1.1.8.3.1. Колесные и гусеничные беспилотные трелевочные машины для хлыстовой заготовки древесины

Учитывая приведенные данные, анализ дорожно-грунтовых условий, а также рассмотренные конструктивно-компоновочные решения (Глава 1), определим следующие параметры гусеничных БПТМ, предназначенных для хлыстовой заготовки древесины при использовании коллаборативной технологии.

Для формирования технического облика гусеничной БПТМ с пачковым захватом в качестве базы целесообразно использовать платформу ТТ-4М (Рис. 1.68 а), которая характеризуется следующими параметрами:

- Максимальная скорость движения – 15 км/ч;
- Предельный угол преодолеваемого подъема – 25 градусов;
- Предельный угол преодолеваемого спуска – 25 градусов;
- Предельный угол преодолеваемого крена – 20 градусов;
- Объем трелеваемой пачки – 10 м³ (масса трелеваемой пачки: за комли – 9т.)

Длина с оборудованием не более 8м. Максимальные габариты (ширина х высота) – не более 3000 мм х 4000 мм с учетом вписываемости в ж/д габарит 1-Т по ГОСТ 9238-2013.

Для формирования технического облика гусеничной БПТМ с манипулятором и самозажимным коником в качестве базы целесообразно было использовать платформу Онежец 300 (Рис. 1.68 б).

Она характеризуется следующими параметрами:

- Максимальная скорость движения – 15 км/ч;
- Предельный угол преодолеваемого подъема – 25 градусов;
- Предельный угол преодолеваемого спуска – 25 градусов;
- Предельный угол преодолеваемого крена – 20 градусов;

- Объем трелеваемой пачки – 8-10 м³ (масса трелеваемой пачки: за комли – 7,2 т.; за вершины – 9 т.)
- Длина с оборудованием не более 7,5 м. Максимальные габариты (ширина x высота) – не более 2800 мм x 3800 мм с учетом вписываемости в ж/д габарит 1-Т по ГОСТ 9238-2013.



а)



б)

Рис. 1.68. База гусеничных беспилотных трелевочных машин:

а) платформа ТТ-4М; б) платформа Онежец 300

Анализ показал [92], что БПТМ должны оснащаться двумя типами технологического (трелевочного) оборудования:

1. Колонной с пачковым (клещевым) захватом (Рис. 1.69 а). Машины данного типа работают в паре с валочно-пакетирующими машинами. Данное оборудование является наиболее приемлемым для БПТМ, так как его использование в удаленном режиме (дистанционное управление) не столь затруднительно, а также процесс набора пачки в 3 – 4 раза быстрее и проще чем у машин манипуляторного типа с самозажимным коником.

2. Манипулятором и самозажимным коником (Рис. 1.69 б).

На формирование облика беспилотных трелевочных машин оказывают влияние системы распознавания условий и управления движением БПТМ. К ним относятся лидары, радары, камеры и антенны приема спутникового сигнала. Правильность их расположения на машине гарантирует ее работу на качественно должном уровне – без потери сигналов и, самое главное, качество получаемой информации с датчиков.

Для формирования технического облика гусеничных БПТМ и последующего моделирования динамики работы БПТМ в прикладных пакетах программ были выбраны эксплуатационные показатели деревьев, наиболее распространённых среди крупного древостоя порядка 60-70% от площади участка лесосеки.

На Рис. 1.69 представлены схемные решения монорамных гусеничных беспилотных трелевочных машин с разным типом трелевочного оборудования.

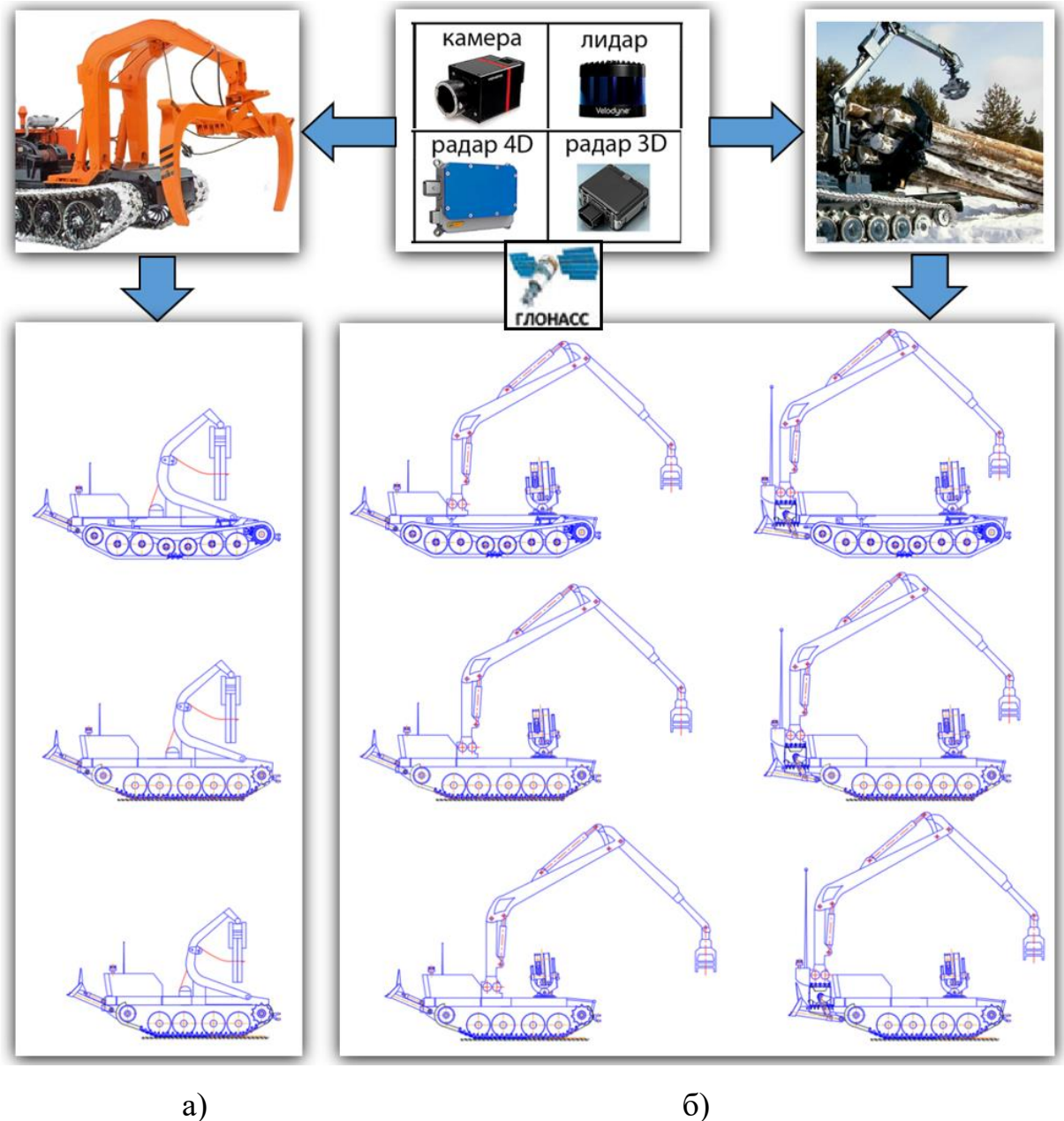


Рис. 1.69. Схемные решения монорамных гусеничных беспилотных трелевочных машин: а) с пачковым захватом; б) с манипулятором и самозажимным коником

В Таблице 9 представлены числовые значения усредненных основных эксплуатационных показателей, наиболее распространенных деревьев среди крупного древостоя, встречаемых на лесосеках [229].

Таблица 9.

Числовые значения усредненных основных эксплуатационных показателей
деревьев среди крупного древостоя

Диаметр на высоте 1,3 м [см]	Диаметр в месте спиливания [см]	Высота дерева [м]	Средний объем хлыста [м³]
32	38,4	25	0,95

Вариант 1. Ниже приведены параметры модели гусеничной БПТМ с пачковым захватом. В данной машине применена упругая рычажно-балансирная подвеска с шестью опорными катками на каждой стороне. Такое решение, наряду с продуманной компоновкой узлов, обеспечивает сбалансированное распределение нагрузки на катки во время трелевки в полупогруженном положении.

В передней части размещены силовая установка, топливные баки и толкатель, а в задней – рабочее оборудование (пачковый захват). В Таблице 10 представлены основные технические параметры модели шестикатковой гусеничной БПТМ с пачковым захватом.

Таблица 10.

Основные технические параметры модели шестикатковой гусеничной БПТМ с
пачковым захватом

№	Наименование	Характеристика
1	Колея	2050 мм
2	База	3479,7 мм
3	Длина (с толкателем)	7042 мм
4	Ширина	2700 мм
5	Высота (с пачковым захватом)	4000 мм
6	Ширина гусеницы	550 мм
7	Диаметр опорного катка	650 мм
8	Ширина опорного катка	160 мм
9	Диаметр ведущего колеса	650 мм
10	Диаметр направляющего колеса	500 мм
11	Площадь зева захвата	1,8 м ²
12	Рейсовая нагрузка	10 м ³

Вес шестикатковой гусеничной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом $G_{\text{БПТМ1}} = 16 \text{ т.};$

На Рис. 1.70 представлено конструктивно-компоновочное исполнение гусеничной БПТМ с пачковым захватом с учетом требований.

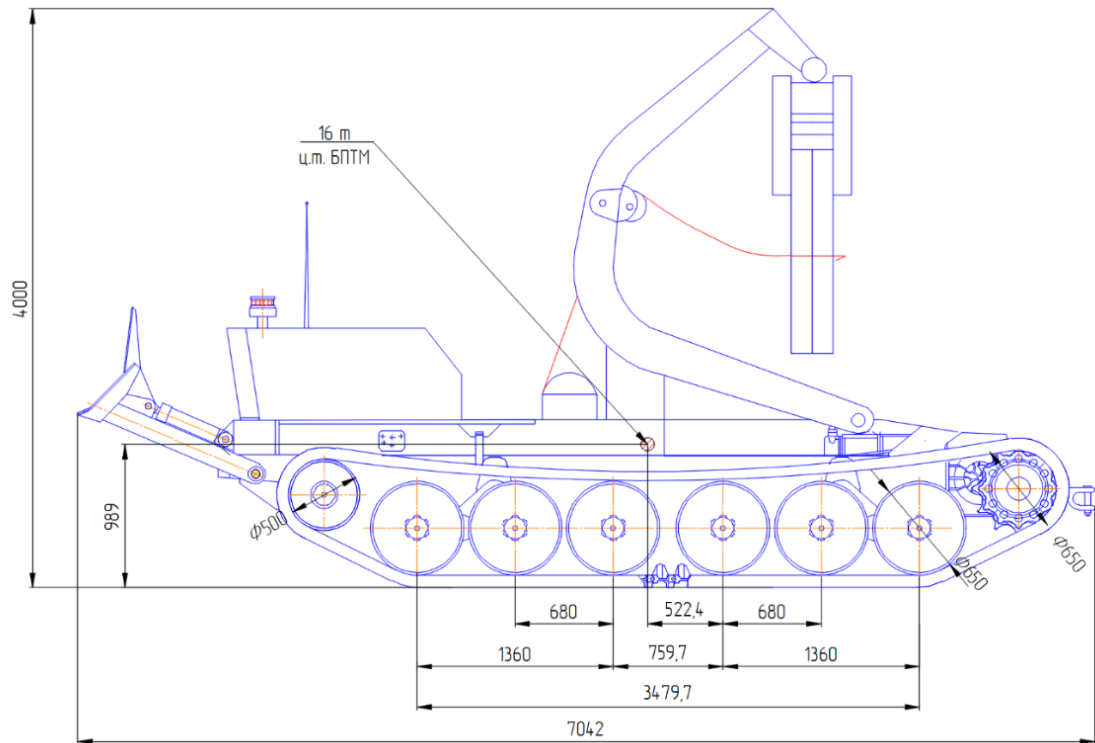


Рис. 1.70. Конструктивно-компоновочное исполнение шестикатковой гусеничной БПТМ с пачковым захватом

В расчетах обычно предполагают, что при трелевке деревьев (хлыстов) комлями вперед машина принимает на себя $2/3$ общего веса (G), а оставшаяся $1/3 G$ скользит по грунту. Если трелюется пачка деревьев объемом 10 м^3 с коэффициентом распределения веса $k=0,67$, то нагрузка на коник машины составит:

$$G_{\text{грБПТМ1}} = 10 \cdot 900 \cdot 0,67 = 6030 \text{ кг} = 6,03 \text{ т}$$

где 900 кг – масса 1 м^3 древесины; $G_{\text{грБПТМ1}}$ – доля веса пачки, приходящейся на БПТМ (Рис. 1.71).

Далее определяется усилие P , необходимое для перемещения части пачки, скользящей по опорной поверхности.

$$G_{\text{гроп}} = 10 \cdot 900 \cdot 0,33 = 2970 \text{ кг} = 2,97 \text{ т.}$$

$$P = 2,97 \cdot (f_c + \sin 8^\circ) = 2,97 \cdot (0,6 + 0,139) = 2,19 \text{ т.}$$

где f_c – коэффициент трения скольжения дерева о грунт.

Основные технические параметры модели четырехкатковой гусеничной БПТМ с манипулятором и самозажимным коником

№	Наименование	Характеристика
1	Колея	1690 мм
2	База	2310 мм
3	Длина (со сложенной стрелой манипулятора)	7050 мм
4	Ширина	2470 мм
5	Высота машины (манипулятор в сложенном положении)	3710 мм
6	Ширина гусеницы	440 мм
7	Диаметр опорного катка	650 мм
8	Ширина опорного катка	150 мм
9	Диаметр ведущего колеса	600 мм
10	Диаметр направляющего колеса	465 мм
11	Площадь захвата самозажимного коника	1,4 м ²
12	Рейсовая нагрузка	8 м ³

Вес четырехкатковой гусеничной беспилотной трелевочной машины с манипулятором и самозажимным коником $G_{\text{БПТМ2}} = 12,5$ т.

На Рис. 1.73 представлено конструктивно-компоновочное исполнение гусеничной БПТМ, оснащенной манипулятором и самозажимным коником с учетом требований.

В расчетах принимаем, что при трелевке деревьев (хлыстов) комлями вперед машина принимает на себя $2/3$ общего веса (G), а оставшаяся $1/3$ G скользит по грунту. Если трелюется пачка деревьев объемом 8 м³ с коэффициентом распределения веса $k=0,67$, то нагрузка на коник машины составит

$$G_{\text{грБПТМ2}} = 8 \cdot 900 \cdot 0,67 = 4824 \text{ кг} = 4,82 \text{ т}$$

где $G_{\text{грБПТМ2}}$ - часть веса пачки, приходящейся на БПТМ (Рис. 1.74).

Требуется рассчитать усилие P , необходимое для преодоления сопротивления скользящей части груза ($1/3$ веса пачки), что зависит от коэффициента трения между древесиной и грунтом.

$$G_{\text{грОП}} = 8 \cdot 900 \cdot 0,33 = 2376 \text{ кг} = 2,37 \text{ т.}$$

$$P = 2,37 \cdot (fc + \sin 6^\circ) = 2,37 \cdot (0,6 + 0,104) = 1,66 \text{ т.}$$

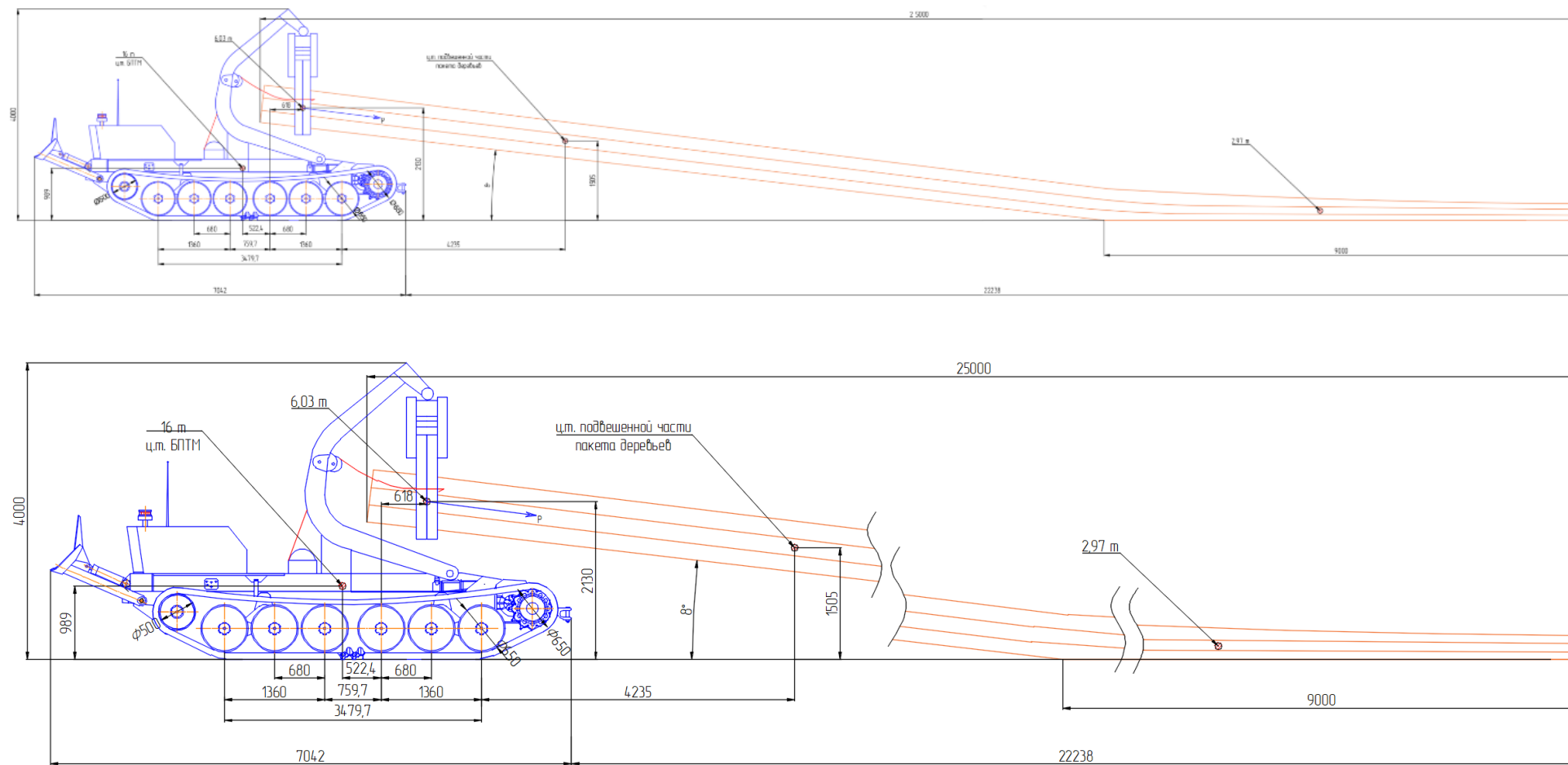


Рис.1.72. Эскиз шестикатковой БПТМ с пачковым захватом и хлыстами, включая габариты и центры тяжести звеньев

На Рис. 1.74 представлено расположение шарниров в трелевочном оборудовании (самозажимном конике).

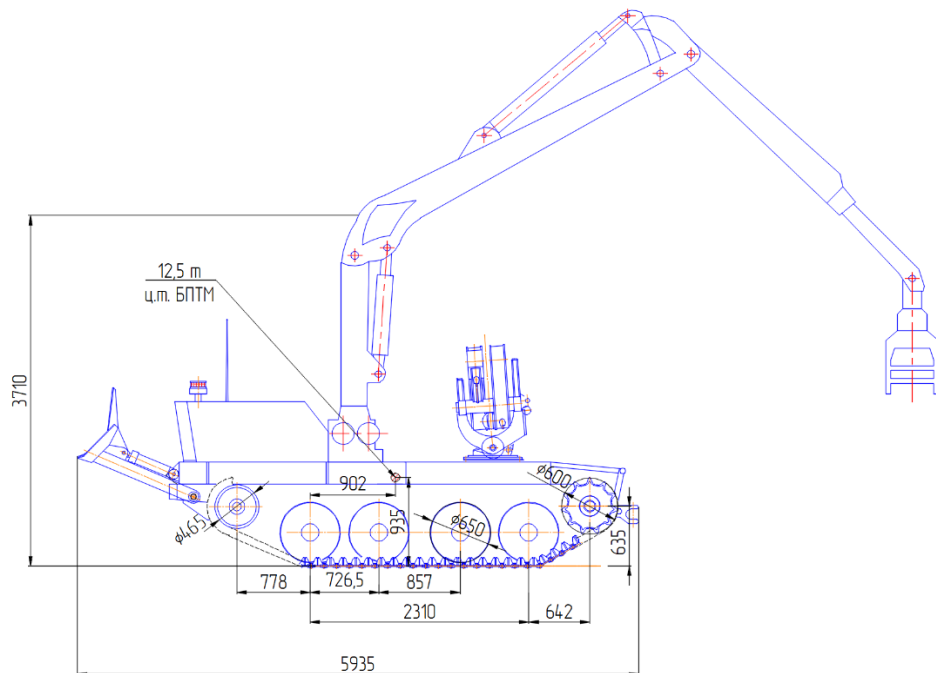


Рис. 1.73. Конструктивно-компоновочное исполнение четырехкатковой гусеничной БПТМ, оснащенной манипулятором и самозажимным коником

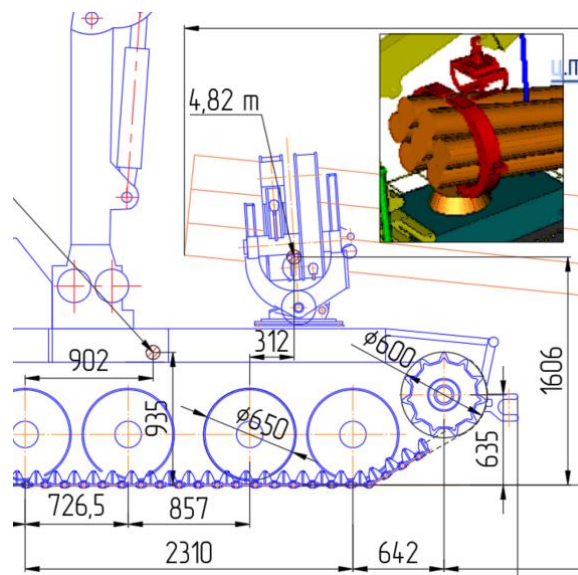


Рис. 1.74. Расположение шарниров в самозажимном конике

На Рис. 1.75. для рассматриваемой четырехкатковой гусеничной беспилотной трелевочной машины с манипулятором, самозажимным коником и хлыстами приведены положение центра тяжести звеньев и габаритные размеры.

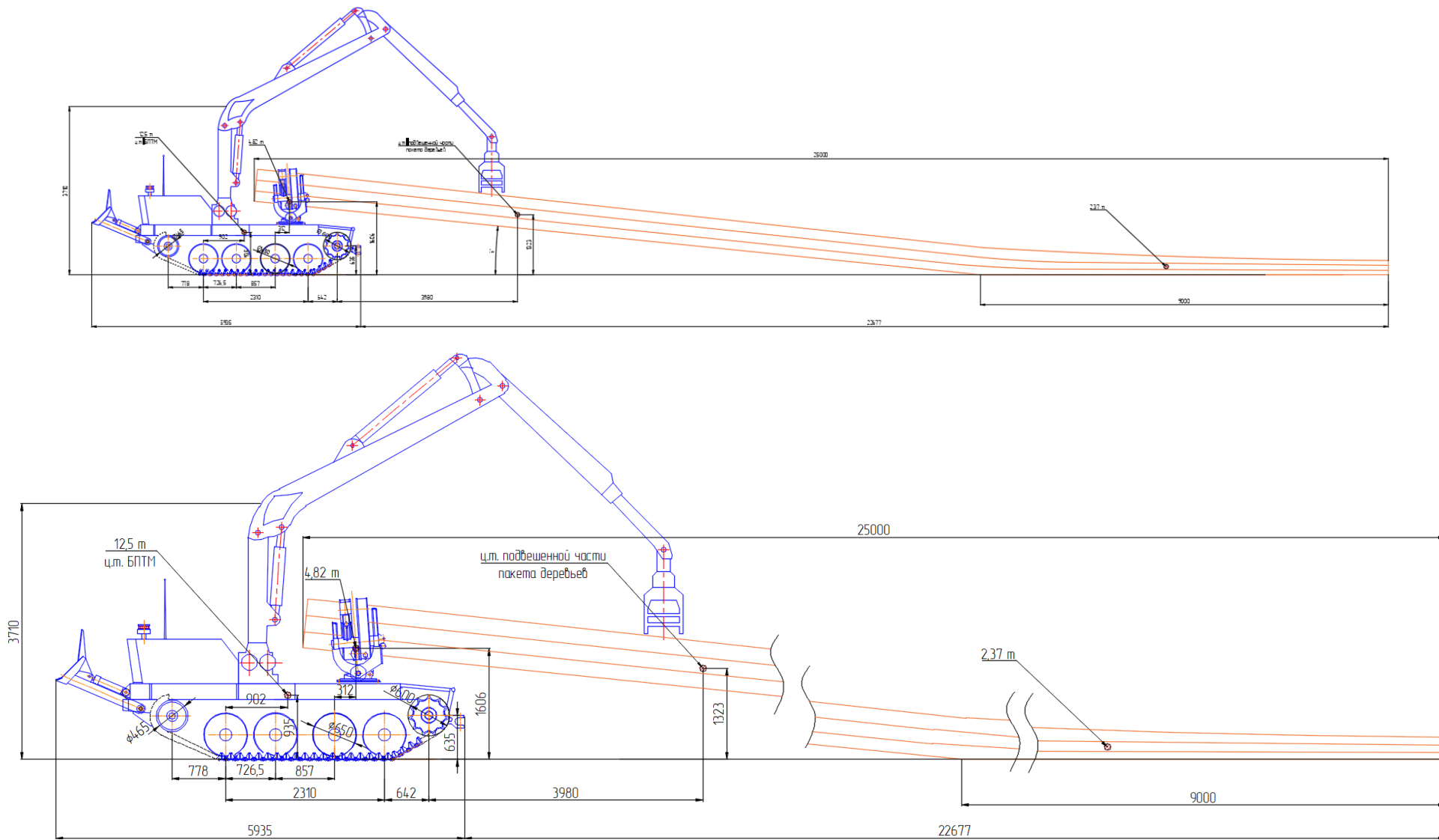


Рис.1.75. Эскиз четырехкатковой БПТМ с манипулятором, самозажимным коником и хлыстами, включая габариты и центры тяжести звеньев

Аналогично сформируем схемные решения для колесных беспилотных трелевочных машин с разным типом трелевочного оборудования, в качестве примера проведем их сравнение с схемными решениями гусеничных БПТМ. На основе проведенного анализа для формирования технического облика колесной БПТМ с пачковым захватом в качестве базы целесообразно использовать хорошо зарекомендовавшие себя колесные скиддеры, к примеру JohnDeere 748H или аналоги.

На Рис. 1.76 представлены схемные решения колесных (4х4 и 6х6) и гусеничной БПТМ с пачковым захватом.

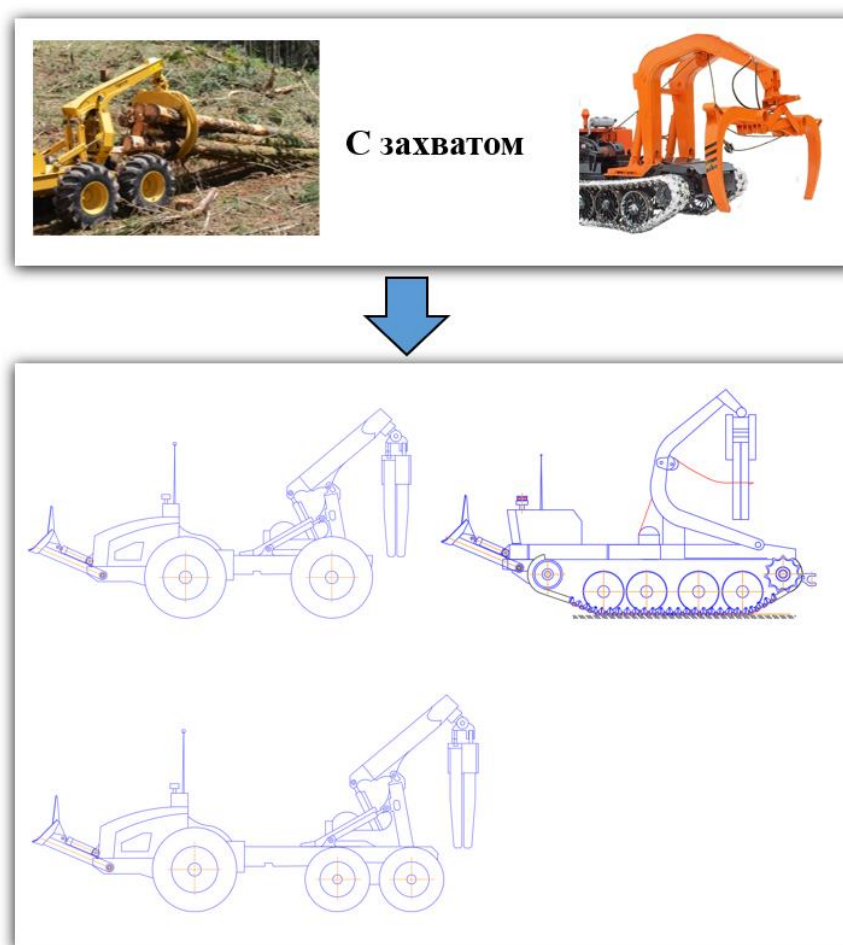


Рис. 1.76. Схемные решения колесных (4х4 и 6х6) и гусеничной БПТМ с пачковым захватом

На Рис. 1.77 представлены схемные решения колесной и гусеничной БПТМ с самозажимным коником и манипулятором.

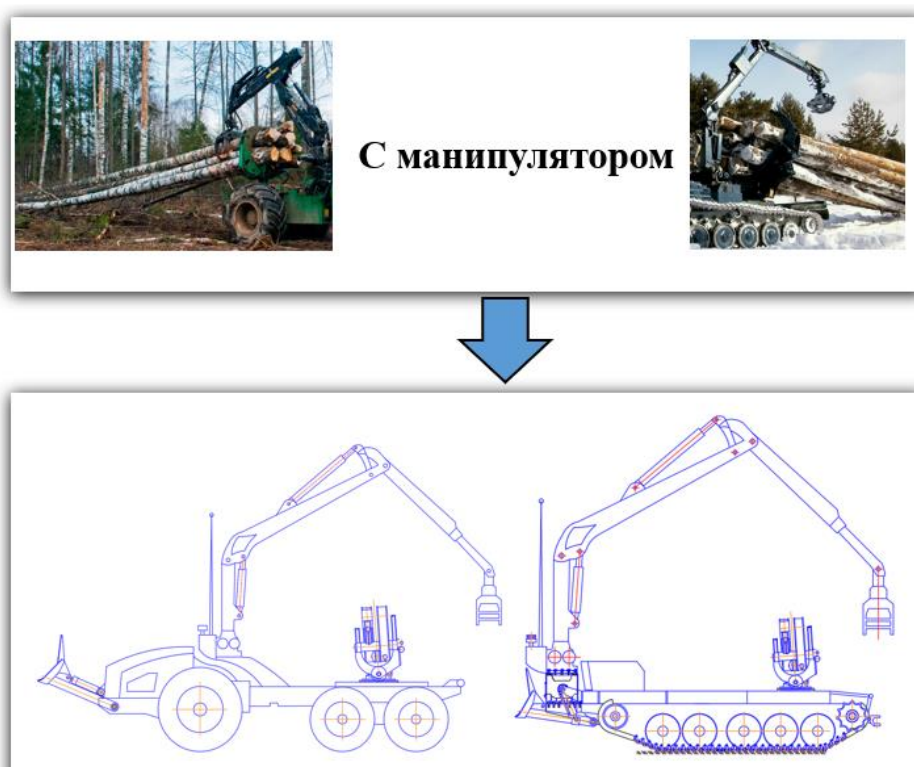


Рис. 1.77. Схемные решения колесной и гусеничной БПТМ с самозажимным коником и манипулятором

В Таблице 12 даны параметры модели колесной БПТМ с пачковым захватом.

Таблица 12.

Параметры модели колесной БПТМ с пачковым захватом

№	Наименование	Характеристика
1	Ширина машины	3240 мм
2	Длина машины	7884 мм
3	База	3275
4	Колея	2440
5	Высота машины при трелевке	4690
6	Высота машины в транспортном положении	до 4000 мм
7	Наружный диаметр колеса	1830мм
8	Ширина профиля колеса	800мм
9	Размер колес	30,5LR32 800/65R32
10	Площадь зева захвата	1,8 м ²
11	Рейсовая нагрузка	10 м ³ (9т пачка)
12	Вес колесной беспилотной трелевочной машины $G_{БПТМк}$	19 т
13	передний модуль	10,5 т
14	задний модуль	8,5 т

На Рис. 1.78 представлено конструктивно-компоновочное исполнение колесной БПТМ с пачковым захватом с учетом требований.

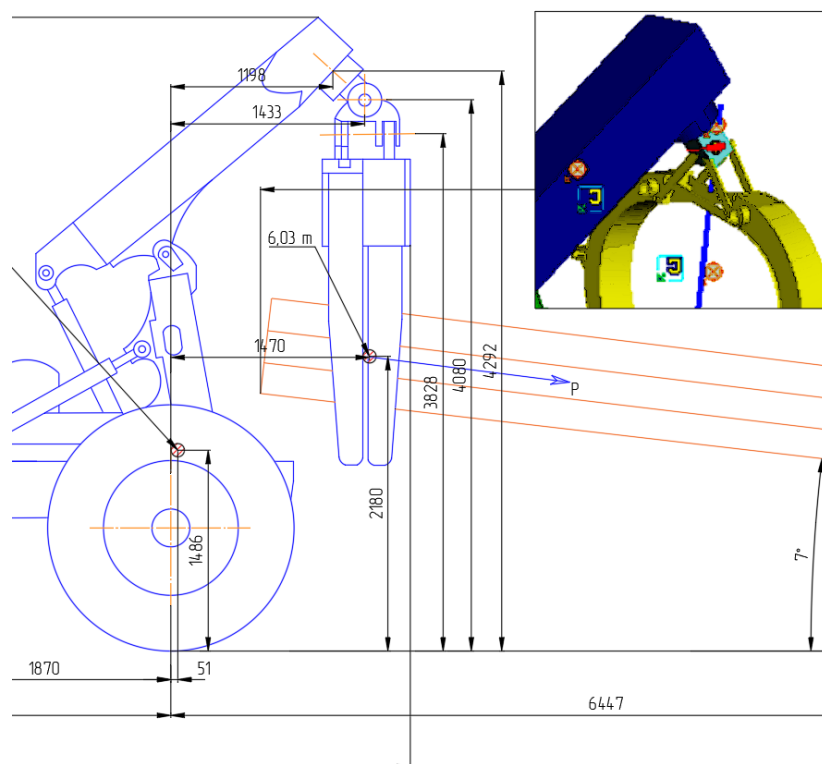


Рис. 1.79. Расположение шарниров в пачковом захвате

Окончательные габариты и расположение центра тяжести звеньев для данной колесной БПТМ с пачковым захватом показаны на Рис. 1.80.

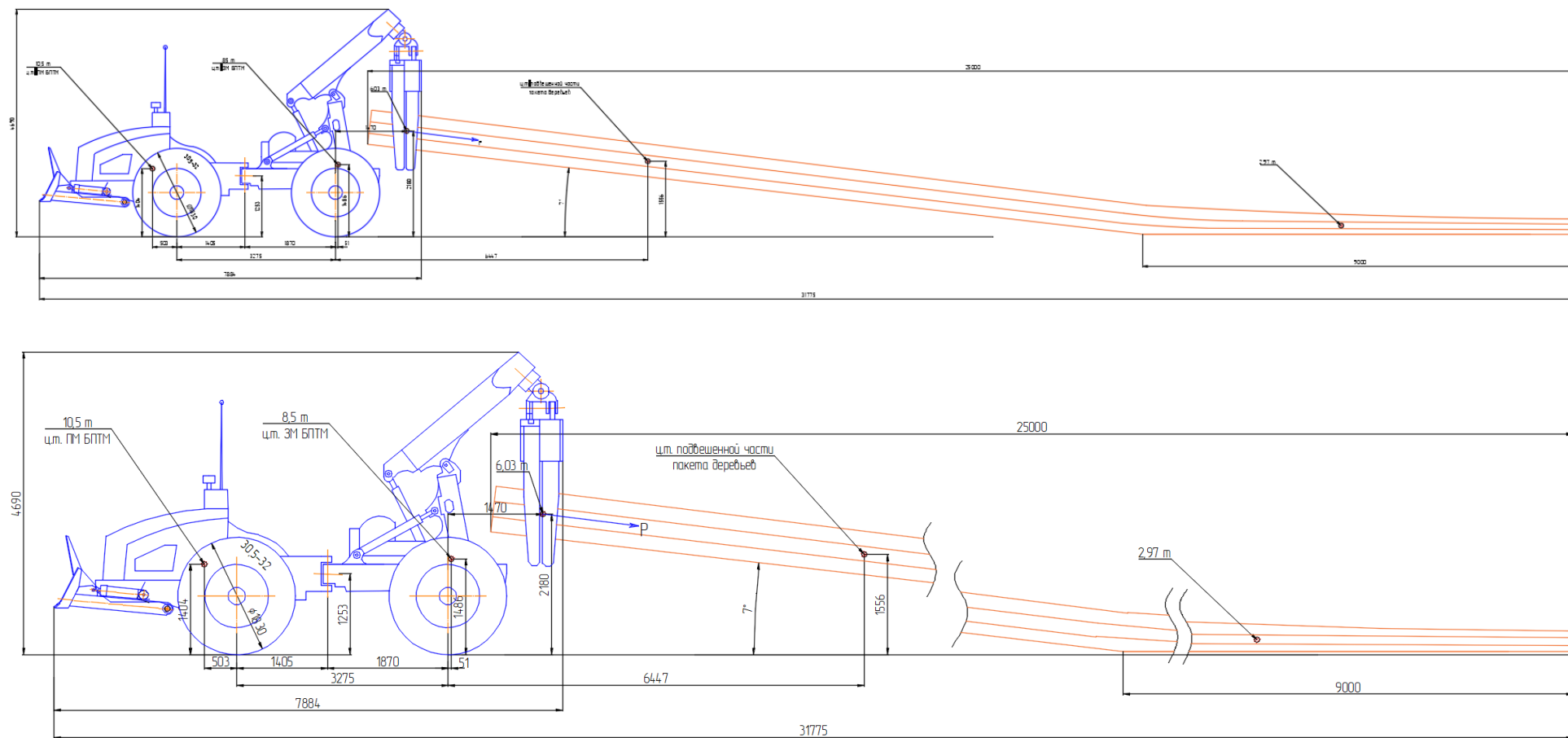


Рис.1.80. Эскиз колесной БПТМ с пачковым захватом и хлыстами, включая габариты и центры тяжести звеньев

1.1.8.4. Схемные решения колесных и гусеничных беспилотных погрузочно-транспортных машин для сортиментной заготовки древесины

На основании предоставленных данных, изучения и анализа дорожных и грунтовых условий, а также рассмотрения существующих компоновочных и конструктивных решений (Глава 1), предлагается рассмотреть различные варианты схемных решений для гусеничных и колесных беспилотных погрузочно-транспортных машин. Данные машины предназначены для для сортиментной заготовки древесины с применением коллаборативной технологии.

На Рис. 1.81 представлена проработка схемных решений гусеничных беспилотных погрузочно-транспортных машин с разным количеством опорных катков и размещением сортиментов на машине.

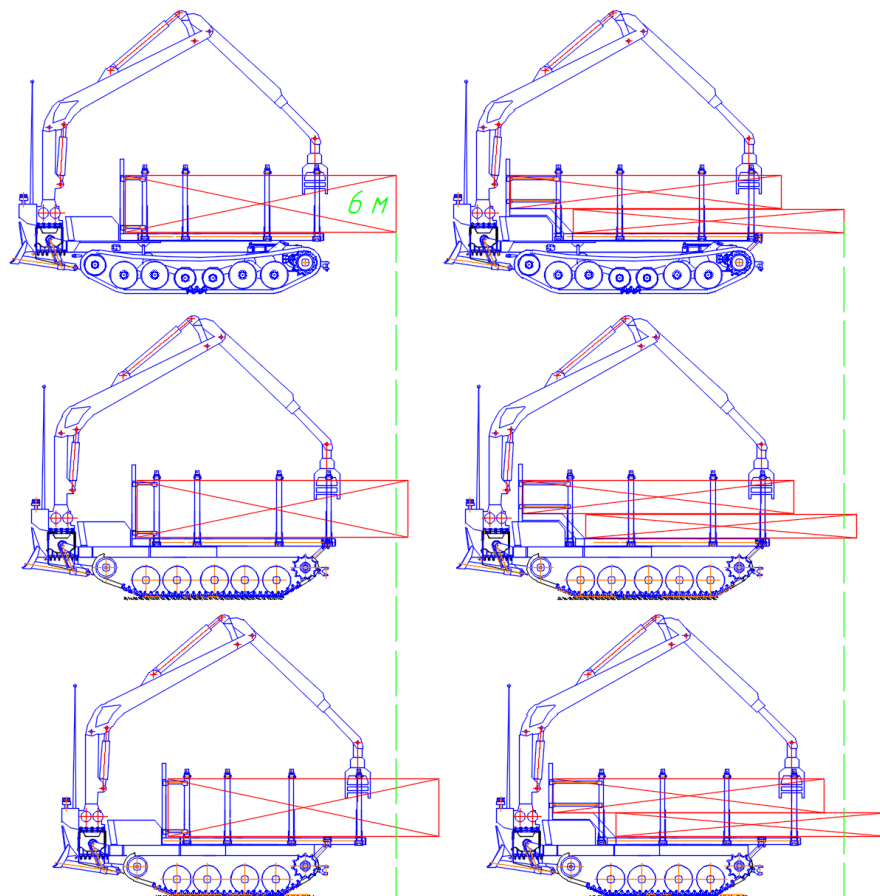


Рис. 1.81. Схемные решения гусеничных беспилотных ПТМ с разным количеством опорных катков и размещением сортиментов на машине

Рассмотрим компоновку размещения измерительных устройств внешней сенсорной сети на переднем и заднем модуле шарнирно-сочлененной колесной беспилотной ПТМ (Рис. 1.82).

В передней части моторно-трансмиссионного модуля колесной шарнирно-сочлененной машины устанавливается блок лидара и камеры в защитном кожухе (Рис. 1.82 а). На капоте устанавливаются антенны спутниковых систем связи и GSM. На задней полураме установлен радар и камера в защищенном корпусе для движения задним ходом. Пример компоновки задней части машины показан на Рис. 1.83. На манипуляторе колесной беспилотной ПТМ устанавливается радар в паре с камерой для контроля процесса сбора и погрузки сортимента в коники машины или в штабель.



Рис. 1.82. Компоновка установки измерительных устройств внешней сенсорной сети на передний и задний модуль колесной беспилотной ПТМ: а) моторно-трансмиссионный модуль (передний); б) технологический модуль (задний)

На Рис. 1.84. показан вид в плане зоны работы измерительных устройств внешней сенсорной сети (лидар, радар, камера). Зеленым цветом выделена зона обзора переднего лидара, синим цветом показана зона работы радара и камеры заднего хода, красным - зона обзора радара и камеры на манипуляторе. [97]



Рис. 1.83. Установки измерительных устройств внешней сенсорной сети на задний модуль колесной беспилотной ПТМ

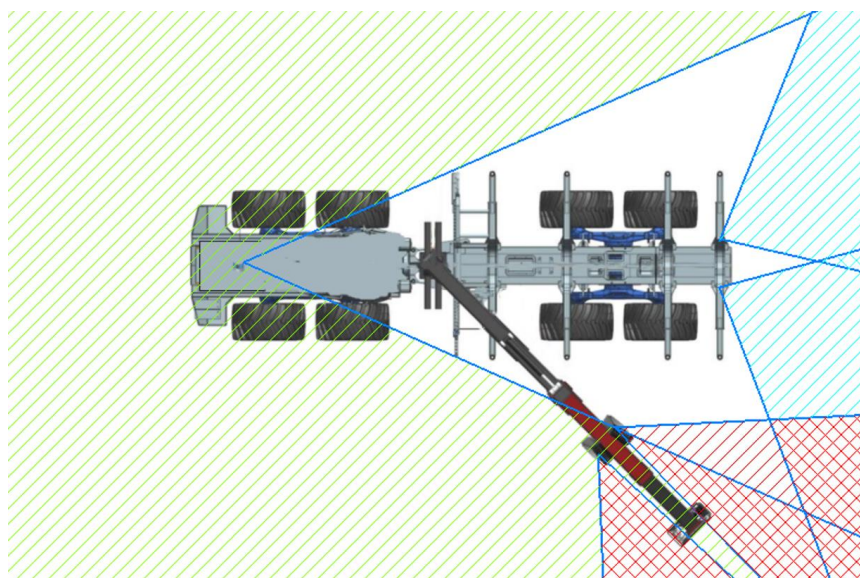


Рис. 1.84. Зона работы измерительных устройств внешней сенсорной сети
вид в плане

1.1.8.5. Вывод по разделу

В ходе проработки облика для осуществления динамического моделирования в прикладных пакетах программ были созданы твердотельные модели гусеничной БПТМ с пачковым захватом 4-го класса тяги (Рис. 1.85 а), гусеничной БПТМ с манипулятором и самозажимным коником 3-го класса тяги (Рис. 1.85 б), гусеничной беспилотной ПТМ для сортиментной заготовки (Рис. 1.85 в); гусеничной беспилотной ПТМ с колесным полуприцепом для сортиментной заготовки (Рис. 1.85 г), колесной БПТМ с пачковым захватом (Рис. 1.85 д), колесной беспилотной ПТМ для сортиментной заготовки (Рис. 1.85 е).

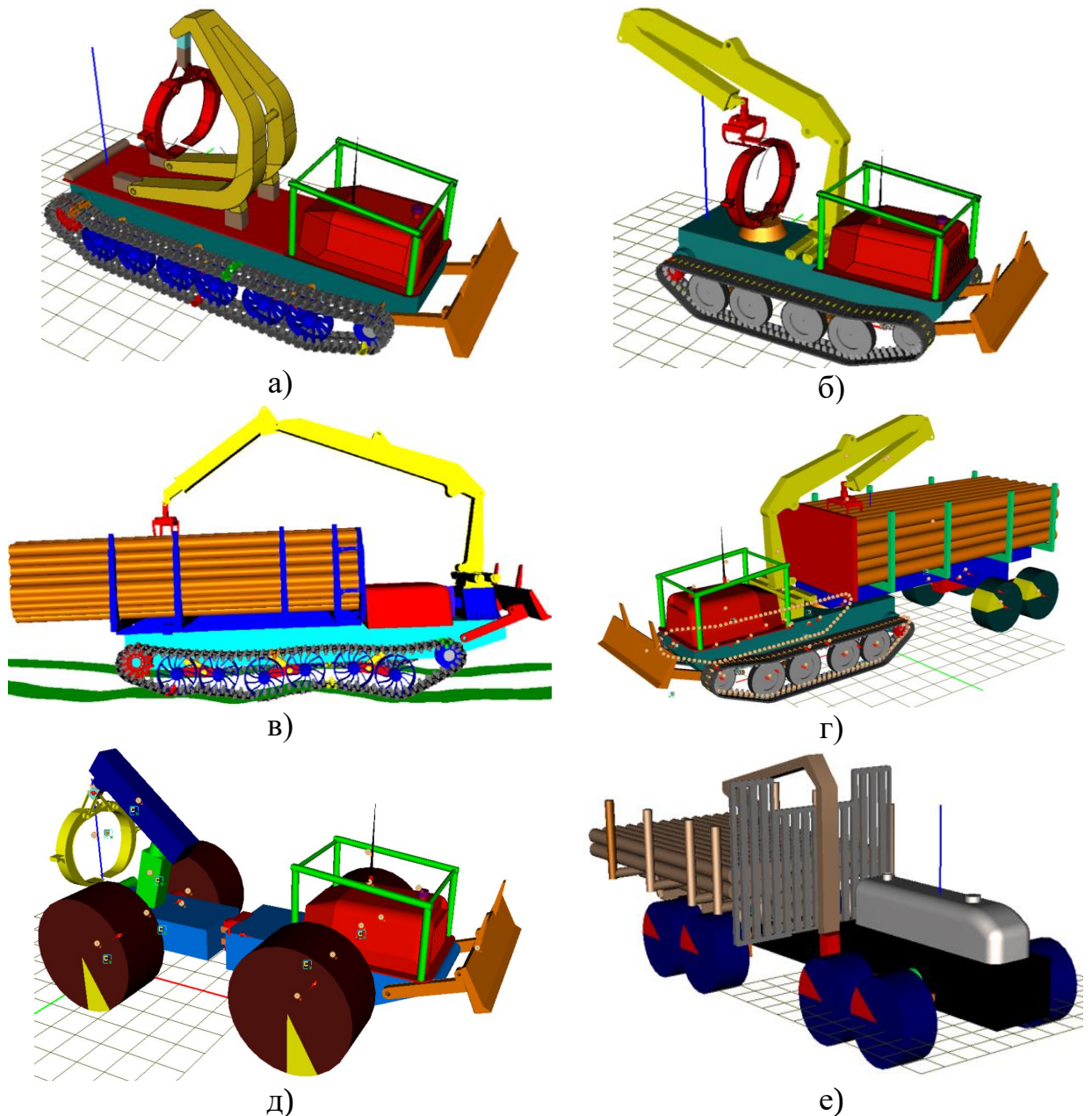


Рис. 1.85. Сформированный облик колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин в пакете программ «Универсальный механизм»:

а) гусеничная БПТМ с пачковым захватом (4 класс тяги); б) гусеничная БПТМ с манипулятором и самозажимным коником (3 класс тяги); в) гусеничная беспилотная ПТМ для сортиментной заготовки; г) гусеничная беспилотная ПТМ с колесным полуприцепом для сортиментной заготовки; д) колесная БПТМ с пачковым захватом; е) колесная беспилотная ПТМ для сортиментной заготовки

Сформирован облик колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин для хлыстовой и сортиментной технологии лесозаготовок, позволяющий

эффективно выполнять технологические операции в соответствии с коллаборативной технологией заготовки древесины (Раздел 1.1.7).

1.2. Требования к основным характеристикам и устройству трелёвочного оборудования с пачковым захватом

Трелёвочная машина, оснащённая пачковым захватом, предназначена для транспортировки пачек деревьев, подготовленных валочно-пакетирующими машинами.

Основные функции оборудования:

- захват лежащей на земле пачки деревьев и её фиксация в захватном устройстве;
- подъём и подтягивание пачки к машине;
- удержание груза во время трелёвки;
- маневрирование с грузом на лесосеке (движение вперёд и назад);
- выгрузка пачки на погрузочной площадке;
- торцовка и формирование штабеля.

Конструкция трелёвочного оборудования:

Состоит из двух ключевых компонентов:

- стрелы с гидравлическим приводом;
- пачкового захвата.

В большинстве случаев в конструкцию также входит лебёдка, выполняющая следующие функции:

- предотвращение раскачивания пустого захвата;
- дополнительная фиксация пачки;
- помощь в освобождении трелевочной машины при застревании.

Трелевочные машины обычно оборудованы бульдозерным отвалом, который используется для:

- выравнивания комлей деревьев;
- формирования пачек и штабелей.

В некоторых моделях вместо отвала применяется гидравлически управляемый щит, расположенный в задней части машины.

Ключевые требования к конструкции и параметрам оборудования:

- габариты и объёмы трелюемых пачек;
- особенности компоновки на базовой машине (тракторе);
- конструктивные, кинематические и силовые характеристики стрелы;
- конструктивные, кинематические и силовые характеристики пачкового захвата;
- требования к управлению, обзорности и безопасности;
- скорость выполнения операций.

1.2.1.1. Характеристики пачек деревьев, формируемых валочно-пакетирующими машинами

Трелёвочная машина с пачковым захватом работает с пачками деревьев, подготовленными валочно-пакетирующими машинами.

На сегодняшний день собраны экспериментальные и теоретические данные, позволяющие определить распределение объёмов пачек в различных лесозаготовительных регионах.

Зависимость высоты пачки от количества деревьев: с увеличением числа деревьев высота пачки сначала возрастает, а затем стабилизируется. Для расчётов максимальную высоту принимают равной 1,2 м (Рис. 1.86).

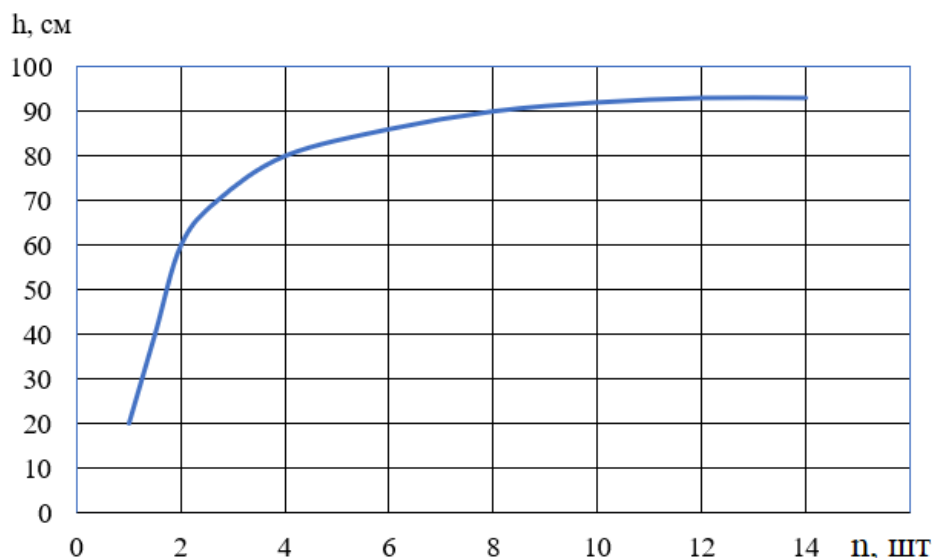


Рис. 1.86. Зависимость высоты пачки от числа деревьев в ней

Площадь поперечного сечения пачки:

На основании исследований установлена зависимость между объёмом пачки ($V_{\text{п}}$, м^3) и площадью её поперечного сечения (S , м^2) на расстоянии 0,5 м от комлевого среза.

Аналитически зависимость выражается уравнением регрессии:

$$S = 0,143 \times V_{\text{п}} + 0,043, \quad (1.5)$$

Для пачки объёмом 10 м^3 расчётная площадь сечения составляет 1,4–1,5 м^2 .

1.2.1.2. Требования к размещению трелёвочного оборудования на базовой машине

Размещение оборудования на БПТМ должно обеспечивать практически равномерное распределение нагрузки между осями при перемещении с грузом.

Зависимость между координатами точки приложения технологической силы и центром масс незагруженной БПТМ выражается уравнением:

$$\frac{b - a \cdot e}{1 + e} = \frac{K_1 \cdot l_2 + K_2 \cdot h_2}{1 + K_1}, \quad (1.6)$$

где: a и b – расстояния от центра масс порожней БПТМ до передней и задней осей соответственно;

l_2 – горизонтальное расстояние от центра масс до точки приложения технологической силы;

h_2 – высота точки приложения силы относительно опорной поверхности;

K_1 – доля вертикальной составляющей технологической силы от веса незагруженной БПТМ;

e – требуемое по условиям проходимости соотношение между нагрузками на переднюю и заднюю оси.

При $e = 1$ и средних значениях $K_1 \approx 0,25$ и $K_2 \approx 1,25$ получим:

$$1 - \frac{a}{b} = 0,4 \frac{l_2}{b} + 0,2 \frac{h_2}{b} \quad (1.7)$$

Это соотношение определяет необходимое для устойчивости распределение нагрузки между осями.

- нагрузка на переднюю ось порожней машины составляет не менее 65% от общего веса машины;

- точка приложения технологической силы находится в пределах базы машины ($l_2 < b$);

- высота расположения точки технологической силы не превышает колесную базу ($h_2 < b$).

Однако в большинстве современных колёсных трелевочных машин с пачковыми захватами эти требования не соблюдаются:

- точка приложения силы смещена далеко за заднюю ось ($l_2 > b$);
- пачка транспортируется в полуподвешенном состоянии на стреле ($h_2 > b$);
- распределение веса порожней машины также не соответствует норме ($a \approx b$).

В результате задняя ось перегружается, что снижает проходимость. Равномерное распределение нагрузки может быть достигнуто при транспортировке пачки в полупогруженном положении.

1.2.1.3. Требования к конструкции, кинематическим и силовым параметрам стрелы

Стрела предназначена для:

- наведения захвата на пачку деревьев;
- подъёма, подтягивания и удержания груза в транспортном положении.

Конструкция стрелы должна обеспечивать:

- удобство захвата пачки;
- хороший обзор рабочей зоны в том числе с использованием средств видеофиксации;

- возможность манёвров при движении вперёд и назад;
- способность выталкивания машины при преодолении препятствий.

Ключевые параметры стрелы:

- горизонтальное расстояние от задней оси до точки подвеса в транспортном положении;

- вылет точки подвеса при захвате пачки и максимальный ход стрелы по горизонтали;

- максимальная и минимальная высота точки подвеса;
- оптимальная траектория движения точки подвеса;

- усилие подъёма, подтягивания и выталкивания.

Горизонтальное расстояние от задней оси до точки подвеса определяется требованиями к компоновке. В идеале точка подвеса должна находиться в пределах базы или над задней осью. Однако в реальных конструкциях она часто смещена назад. Расстояние зависит от необходимого для манёвров зазора между стрелой и захватом (около 1,5 м).

Ход стрелы по горизонтали влияет не только на вылет захвата, но и на возможность перестановки машины при буксовании.

Опыт эксплуатации показывает, что лучшую проходимость имеют машины, оборудование которых позволяет сбросить пачку при пробуксовке для переезда на новое место. Потеря проходимости чаще всего происходит:

- при страгивании с места (сопротивление возрастает в 2–2,5 раза);
- при преодолении препятствий (пни, валежник и т. д.).

В таких случаях эффективным решением является отталкивание машины от пачки за счёт горизонтального хода стрелы.

Максимальная высота точки подвеса определяется:

- условиями манёвренности при движении вперёд и назад;
- минимизацией сопротивления при волочении пачки.

Если захват расположен над задней осью, комли деревьев должны свободно проходить над колёсами. При диаметре колёс 1,8 м высота подвеса должна быть около 3,2 м. Если захват смещён назад, высота рассчитывается исходя из минимального сопротивления волочению.

1.3. Требования к трансмиссиям трелевочных машин и системам управления движением

Наиболее целесообразным для эффективного и безопасного движения колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин является применение в их конструкции бесступенчатых трансмиссий. Актуальными на сегодняшний

день является применение электромеханических и гидрообъемных трансмиссий [140, 144].

Криволинейное движение гусеничных и колесных машин с «кинематическим» способом поворота обеспечивается за счет складывающего момента в узле сочленения. Наиболее эффективным решением в данном случае является применение дифференциальной схемы трансмиссии [159], которая позволяет при маневрировании обеспечить сближение звеньев машины друг к другу. Такая схема трансмиссии широко используется в современных отечественных и зарубежных сочлененных машинах.

Работа трансмиссии при повороте характеризуется двумя основными безразмерными параметрами.

1) Относительный прирост мощности двигателя ($P_{\mu} = N_{\text{дв}} / N_{\text{дв пр}}$).

Этот показатель отражает изменение мощности двигателя во время поворота. Например, для механизмов поворота (МП), основанных на несимметричных дифференциалах, P_{μ} равен 1, тогда как в других конструкциях МП он может быть значительно выше [175]. Так, в двухпоточных дифференциальных МП с гидрообъемной передачей значение P_{μ} может достигать 4-5 при развороте вокруг центра масс, что создает риск перегрузки двигателя или гидropередачи. Для предотвращения этого применяют комбинацию гидрообъемной передачи и бортовых коробок передач. P_{μ} зависит не только от конструкции МП, но и от параметров шасси, а также характеристик опорной поверхности [66].

2) Относительная мощность, теряемая при буксовании управляющего элемента ($P_{\sigma} = N_{\sigma} / N_{\text{дв}}$)

Данный параметр позволяет оценить нагрузку на управляющий элемент, спрогнозировать износ фрикционных дисков и тепловыделение. Поскольку основные потери энергии связаны с буксованием, P_{σ} можно рассматривать как аналог КПД для многих МП. На его величину также влияют внешние факторы, включая особенности шасси и свойства опорного покрытия.

Расчетные радиусы поворота определяются без учета буксования в элементах управления МП. Хотя количество таких радиусов (n_p) может служить индикатором энергозатрат, этот метод не всегда эффективен. Например, в многопоточных МП с гидрообъемной передачей n_p теоретически бесконечно. В качестве альтернативы предлагается использовать безразмерный коэффициент $П_p = 1 - 1 / n_p$, где $П_p \in [0,1]$, так как $n_p \in [1,\infty]$. Для некоторых МП (одноступенчатых планетарных, простых дифференциалов, бортовых фрикционов с тормозом) $n_p = 0$. Этот параметр в большей степени отражает энергетические свойства МП, а не качество управления. Например, бортовые коробки передач увеличивают $П_p$, но не обязательно улучшают маневренность.

Вопросы оценки энергоэффективности механизмов поворота детально исследованы в научных трудах [67, 68, 76].

Повышение энергоэффективности лесозаготовительных машин требует решения следующих задач:

- минимизация потерь мощности в механизмах поворота;
- снижение нагрузки на двигатель при маневрах;
- улучшение управляемости, что напрямую влияет на производительность машины.

В гусеничных лесозаготовительных машинах (ГЛЗМ) традиционно применяется бортовой фрикцион с тормозом (БФТ), отличающийся низкой стоимостью и высокой ремонтпригодностью. Существующая конструкция поворотного механизма вызывает резкие рывки при изменении направления движения. Минимальный относительный радиус поворота такой системы равен $\rho_f = R_f / B = 0,5$ (где R_f - радиус поворота при полной блокировке отстающей гусеницы тормозом; B - колея машины). Недостаточная точность управления осложняет маневрирование на лесосеках, что отрицательно сказывается на производительности, повышает усталость машиниста и исключает возможность автоматизации процесса управления.

На Рис. 1.87 демонстрируются кинематические решения различных поворотных механизмов:

- а) система с бортовым фрикционом и тормозом;
 б, в) одноступенчатые планетарные механизмы;
 г) аналог системы ZF Vector Drive.

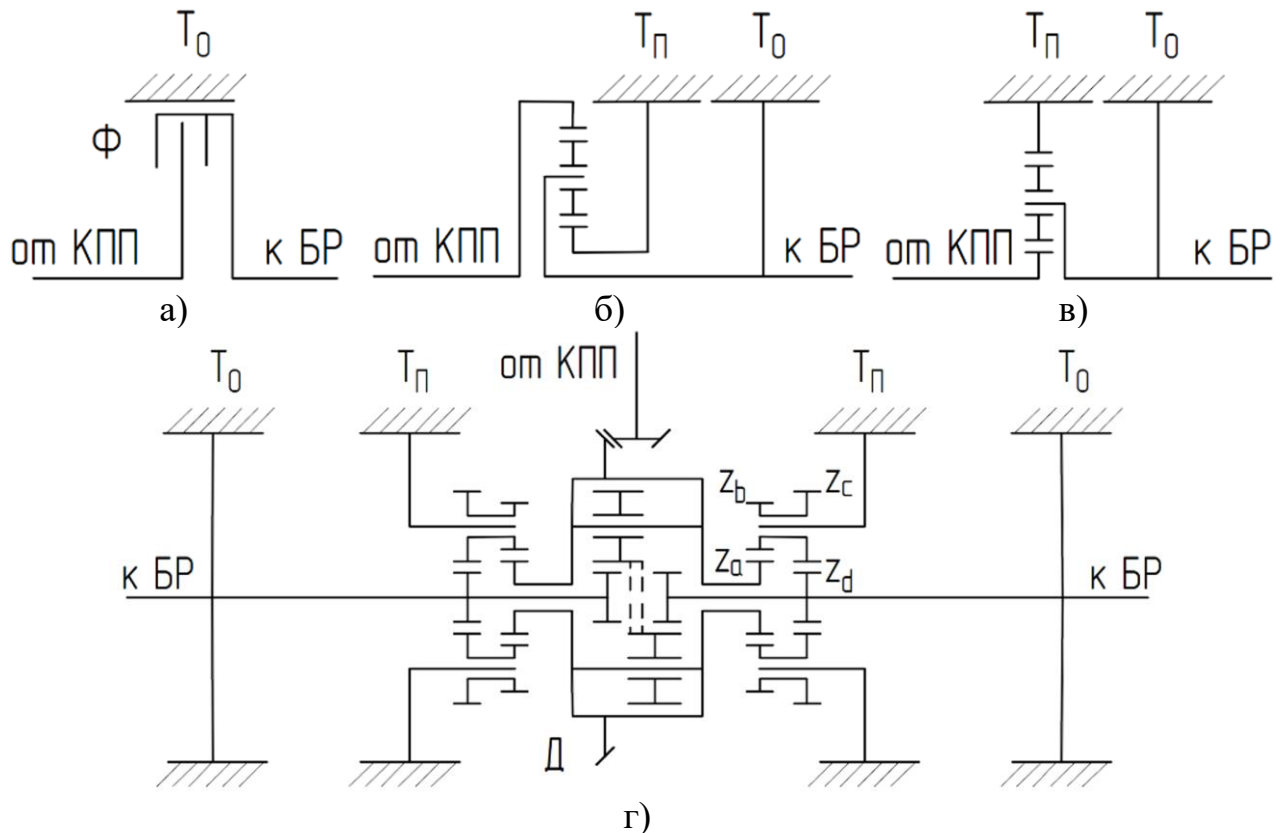


Рис. 1.87. Кинематические схемы МП: z_a, z_b, z_c, z_d – числа зубьев шестерен; Д – дифференциал; ТП и Т0 – тормоза механизма поворота и остановочный; Ф – фрикцион

Наиболее эффективной альтернативой признаны планетарные механизмы поворота (ПМП), обеспечивающие плавное регулирование радиуса в двух режимах:

- при задействовании тормоза планетарного ряда ($\rho \in (\infty, \rho_f]$);
- при включении остановочного тормоза ($\rho \in (\rho_f, 0,5]$).

Величина ρ_f зависит от конструкции планетарной передачи. Оптимальные характеристики управления достигаются при использовании двухпоточного дифференциального МП с гидрообъемной передачей (ГОП) в параллельном потоке мощности.

Рис. 1.88 иллюстрирует схему двухпоточной трансмиссии, содержащей:

- редуктор бортовой (БР);

- суммирующий планетарный ряд (СПР);
- тормоз остановочный (ТО);
- тяговый электродвигатель (ТЭД).

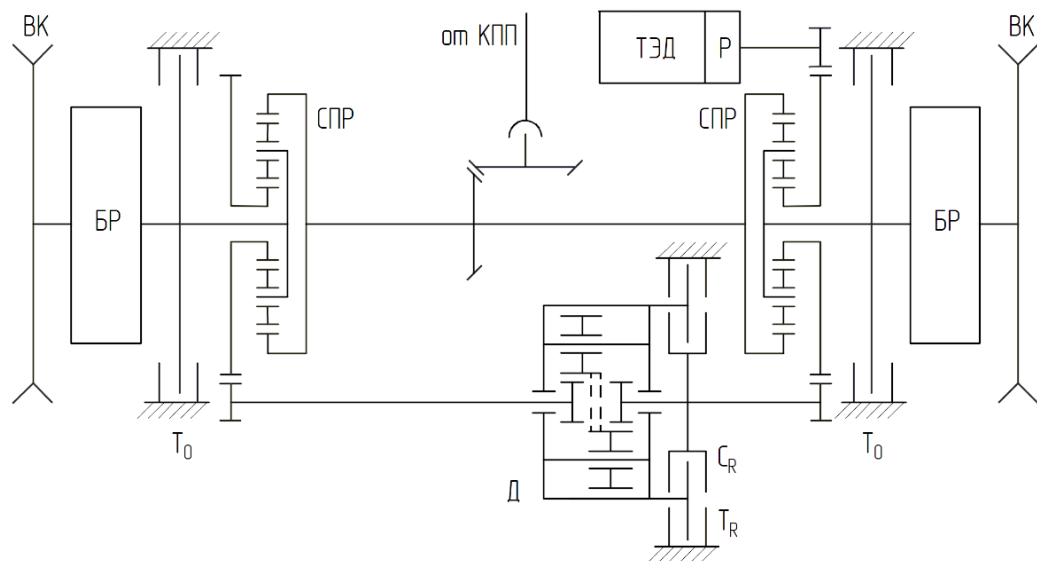


Рис. 1.88. Кинематическая схема двухпоточной трансмиссии: Р – реверс-редуктор параллельного потока; ВК – колесо ведущее; Д – дифференциал с элементами управления CR и TR

Для гусеничных беспилотных трелевочных машин (ГБПТМ) целесообразна замена БФТ на бортовые планетарные механизмы с гидроприводом. Для перспективных моделей оптимальным вариантом считается гибридный МП с электродвигателем в параллельном потоке мощности. Современные достижения в области электротехники позволяют проектировать энергоэффективные, легкие и компактные электрические машины, а также накопители энергии.

1.4. Анализ математических моделей движения колесных и гусеничных машин

1.4.1. Описание математической модели взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием

Современные подходы к анализу контакта гусеничного движителя с опорным основанием (ОО) предполагают изучение взаимодействия траков или

отдельных участков гусеницы, расположенных под опорными катками техники [32, 75]. Для более точного учета ширины гусеницы контактные зоны разделяют на элементы, каждый из которых характеризуется своими силовыми параметрами в области соприкосновения с ОО [106, 115].

Несмотря на глубокое изучение физико-механических свойств грунтов, аналитическое описание взаимодействия гусениц с опорной поверхностью остается сложной задачей. Это связано с динамическим характером нагружения грунта элементами гусеницы, что делает неприменимыми классические законы механики грунтов.

В связи с этим для моделирования данного процесса широко используются экспериментальные данные, позволившие установить общие закономерности. На их основе рассматривается взаимодействие участков опорной поверхности гусеницы с грунтом.

При криволинейном движении гусеничной машины каждый элемент опорной поверхности гусеницы совершает сложное перемещение, включающее продольное и поперечное смещение относительно оси машины [70, 115, 152, 174]. Для упрощения анализа принимается, что направление движения трака в конкретный момент времени совпадает с направлением абсолютной скорости его центра масс, который приблизительно соответствует геометрическому центру трака.

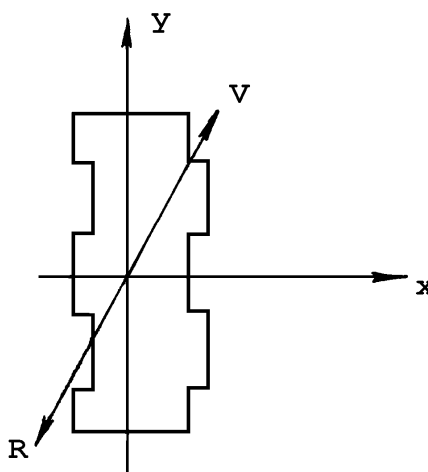


Рис.1.89. Система координат для анализа взаимодействия трака с грунтом

Сила взаимодействия трака с грунтом R зависит от величины и направления его перемещения, поскольку опорная поверхность трака имеет

сложную форму, а сопротивление движению в продольном и поперечном направлениях различается.

Таким образом, при одинаковой величине перемещения трака относительно грунта σ и постоянном нормальном давлении Q реакция R будет изменяться в зависимости от направления скольжения (меняется коэффициент μ).

Графическое представление вектора силы R при $Q=1$ называется годографом коэффициента взаимодействия трака с грунтом (μ). Экспериментальные исследования [1, 2] показали, что этот годограф близок к эллипсу и описывается уравнением:

$$\mu = \frac{\mu_x \cdot \mu_y}{\sqrt{\mu_x^2 \cdot \sin^2 \alpha + \mu_y^2 \cdot \cos^2 \alpha}}, \quad (1.8)$$

где μ_x , μ_y – коэффициенты взаимодействия трака при продольном и поперечном его смещении на величину σ ;

α – угол между направлением смещения трака и продольной осью машины.

Различие в сопротивлении грунта продольному и поперечному смещению учитывается коэффициентом анизотропии λ :

$$\lambda = \mu_{y \max} / \mu_{x \max}. \quad (1.9)$$

При моделировании криволинейного движения гусеничной машины часто применяют метод учета момента сопротивления повороту. Величина этого момента определяется характеристиками ДГУ и распределением нормального давления по гусеницам. Учет ДГУ осуществляется через коэффициент $\mu(R)$, рассчитываемый по эмпирической формуле [65]:

$$\mu(R) = \frac{\mu_{\max}}{0,925 + 0,15 \frac{R}{B}}, \quad (1.10)$$

где R – теоретический радиус поворота гусеничной машины;

B – колея гусеничной машины;

$\mu_{\max}$ – коэффициент сопротивления повороту $R = B / 2$ (поворот вокруг остановленной гусеницы).

Дальнейшие исследования позволили развить теорию для различных режимов движения гусеничных машин [28, 99, 118, 147].

Более сложные модели учитывают не только контактное взаимодействие движителя, но и динамику узлов машины [24, 81, 156]. С развитием вычислительных технологий стали применяться методы конечных элементов, гидродинамики сглаженных частиц и дискретных элементов [31, 44, 54]. Эти подходы обеспечивают высокую точность, моделируя геометрию и кинематику движителя, однако требуют значительных вычислительных ресурсов.

В данном исследовании используется аналитическая модель, в которой коэффициент взаимодействия с ОО распределяется согласно закону «эллипса трения». Этот метод обеспечивает достаточную точность, позволяет проводить расчеты в реальном времени и требует минимального набора параметров для описания дорожно-грунтовых условий, что является важным преимуществом.

1.4.2. Описание математических моделей взаимодействия колесного движителя с опорным основанием

На сегодняшний день известно большое количество математических моделей, которые описывают взаимодействие движителя колесной машины с опорным основанием, наиболее распространенными среди которых являются:

- подход, основанный на работах Чудакова Е.А. [167] и Певзнера Я.М.;
- для описания взаимодействия движителя с ОП модели качения, которые используют интегральные характеристики [3], [4], [16], [18];
- модели качения, рассматриваемые с позиции механической аналогии [30];
- модели качения колеса конечно-элементного типа [43], [45].

Основные положения классического подхода описаны в трудах Е.А. Чудакова и Я.М. Певзнера и в настоящее время детально рассматриваются в различных учебных и научных изданиях. Данный подход активно используется при анализе устойчивости колесных и гусеничных транспортных средств [16, 18, 111].

Согласно классической теории, продольная реакция в зоне контакта колеса с поверхностью определяется вертикальной реакцией и коэффициентом взаимодействия в продольном направлении:

$$R_x = \mu_x (s_x) R_z, \quad (1.11)$$

где $\mu_x(s_x)$ – коэффициент продольного взаимодействия колеса с ОО;

R_z – вертикальная реакция в пятне контакта колеса с ОО;

s_x – коэффициент буксования колеса.

В пятне контакта поперечная реакция принимается как функция угла увода δ (угла отклонения поступательной скорости движения центра колеса от плоскости его вращения):

$$R_y = k_y \delta, \quad (1.12)$$

где k_y – коэффициент сопротивления боковому уводу;

δ – угол увода.

В соответствии с теорией нелинейного увода, предложенной Антоновым Д.А., коэффициент сопротивления боковому уводу определяется более строго [16]. Рассматривая представленный подход, k_y определяется исходя из базового значения коэффициента k_{y0} с учетом коэффициентов коррекции q_i , которые являются функциями параметров качения колеса. Коэффициенты коррекции оказывают более значимое влияние на коэффициент k_y , учитывают изменение давления воздуха в шине q_w , коэффициент сцепления шины с опорным основанием q_φ , продольной q_{Rx} реакции и нормальной q_{Rz} реакции.

$$k_y = k_{y0} \cdot q_w \cdot q_\varphi \cdot q_{Rx} \cdot q_{Rz}, \quad (1.13)$$

При этом учитывается, что исходя из выражения ограничивается суммарная сила взаимодействия колеса с опорным основанием:

$$\sqrt{R_x^2 + R_y^2} \leq \mu_{max} R_z, \quad (1.14)$$

где μ_{max} – коэффициент взаимодействия колеса с опорным основанием при полном скольжении.

Математическая модель взаимодействия колеса с опорной поверхностью представляет собой систему уравнений (алгебраических или дифференциальных), устанавливающих связь между силовыми параметрами контакта (продольная и поперечная силы и др.) и известными кинематическими показателями. Входными параметрами модели могут служить скорость центра

масс машины, относительная скорость нижней части шины и другие величины [207]. При численном моделировании такая модель позволяет вычислить производные координат системы на текущем шаге интегрирования и спрогнозировать ее состояние в следующий момент. Общий вид модели колеса можно записать как:

$$\begin{aligned} R_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3 \dots) \\ &\dots \\ R_i &= f_i(x_1, x_2, x_3 \dots) \end{aligned} \quad (1.15)$$

где R_i – силовой параметр взаимодействия;

x_i – известный кинематический параметр взаимодействия.

Функция f_i и состав параметров x_i определяются физическими особенностями контакта колеса с поверхностью.

Исследования качения эластичного колеса развивались в двух направлениях. Первое связано с анализом динамики и кинематики неголономных систем с классическими неголономными связями. Существует несколько теоретических моделей качения пневматического колеса, различающихся степенью учета увода [225], включая теории И. Рокара, И. Грейдануса, М.В. Келдыша и А.А. Хачатурова.

Второе направление базируется на экспериментальных данных и эмпирических зависимостях.

И.К. Пчелин и А.А. Хачатуров изучили движение автомобиля с учетом упругих деформаций шины [225], заменив экспериментальные соотношения между боковыми силами и углами увода на кинематические уравнения связи, предложенные М.В. Келдышем.

М. Апетаур в [182] опирается на теорию кинематических связей М.В. Келдыша, развитую И.К. Пчелиным и А.А. Хачатуровым [225].

В рамках классического подхода вводится радиус качения – условная величина, определяемая соотношением:

$$r_k = \frac{V_\sigma}{\sigma \cdot \omega_k}, \quad (1.16)$$

где V_σ – скорость проскальзывания колеса по ОО;

ω_k – угловая скорость колеса;

σ – коэффициент буксования, вычисляемый по формуле:

$$\sigma = \frac{V_{пер} - V_{отн}}{V_{отн}}, \quad (1.17)$$

где $V_{пер}$ – переносная скорость колеса вдоль его срединной плоскости; $V_{отн}$ – скорость нижней точки колеса относительно корпуса машины.

Ввиду значительного роста вычислительных мощностей в настоящее время для описания взаимодействия колеса с опорной поверхностью стало возможным применять на базе конечных элементов математические модели. Высокая точность моделирования достигается за счет применения математических моделей, описанных выше. Представленные математические модели также применимы для описания контакта колеса с ОО типа «плотный грунт».

Анализ рассмотренных математических моделей позволяет заключить, что при моделировании взаимодействия колеса с поверхностью целесообразно принять следующие допущения:

- касательную силу взаимодействия колеса с ОО следует определять методом «эллипса трения»;
- считать контакт колеса с поверхностью точечным;
- направлять вектор касательной силы против скорости скольжения [226-228].

1.5. Задачи исследования

В результате проведенного анализа научной проблемы определена необходимость решения следующих задач для достижения поставленной цели

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

Глава 2. Разработка математических моделей движения колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин

В главе разработаны имитационные математические модели движения колесных и гусеничных БПТМ (КБПТМ и ГБПТМ) с различным технологическим оборудованием, отличающиеся возможностью моделирования перемещений трелеваемой пачки хлыстов в полупогруженном состоянии.

Для выбора приоритетного технического решения БПТМ необходимо определение показателей подвижности, основанного на методах с использованием имитационного математического моделирования. Использование системы уравнений динамики твердых тел позволяет описать движение элементов гусеничного и колесного движителя БПТМ и пачки хлыстов. Такие системы связанных уравнений могут быть реализованы в современных комплексах инвариантного моделирования динамики систем тел: ПК «Универсальный механизм», ПК «ФРУНД», ПК «Эйлер», ПК «Adams» и т.д. [55, 56, 218, 219, 220, 221, 222].

В данной главе представлены основные принципы построения систем уравнений в современных программных средах для автоматизированного моделирования динамики механических систем. Приводятся структурные схемы созданных математических моделей для колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин, а также описываются ключевые компоненты (блоки), моделирующие работу различных систем этих машин.

Особое внимание уделено моделированию контакта движителей с внешней средой, в частности, детально проанализировано взаимодействие колесного и гусеничного движителей с малодеформируемым основанием, таким как плотный грунт.

Предложенные математические модели дают возможность исследовать динамику беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин, транспортирующих груз в виде пачки деревьев (хлыстов), которые находятся в

полупогруженном и полуподвешенном состоянии. При этом учитывается взаимодействие активных элементов движителя с опорной поверхностью.

2.1. Математическое описание уравнений динамики в программных комплексах моделирования

Метод формирования уравнений движения твердых тел позволяет автоматически строить систему уравнений для произвольной механической системы путем задания параметров связей между телами, которые под воздействием внешних сил перемещаются в пространстве. Данный метод обеспечивает углубленное изучение динамики твердых тел, а также анализ кинематических и силовых взаимодействий между телами.

Системой твердых тел можно рассматривать движитель (колесный и гусеничный) беспилотной трелевочной машины. Твердые тела движутся под влиянием внешних воздействий и связаны между собой силовыми и кинематическими связями.

Компоненты движителя представляются в модели как твердые тела, совершающие движение в пространстве.

Твердыми телами моделируются элементы движителя, перемещающиеся в пространстве. Системой дифференциальных уравнений описывается динамика их движения. Уравнениями описываются связи между каждым телом и их движение. Прикладные пакеты программ целесообразнее всего использовать для автоматизированного синтеза таких уравнений.

Ниже приведены примеры прикладных пакетов программ предназначенных для моделирования динамики систем тел: Универсальный механизм [218], ФРУНД [219], Euler [220], ADAMS [221], MATLAB Simscape/Multibody [222].

Различные пакеты могут применять отличающиеся подходы к формированию уравнений, например, использование относительных координат вместо абсолютных. Уравнения динамики могут быть записаны как в виде

второго закона Ньютона, так и через уравнения Лагранжа первого рода, но для пользователя выбор формы записи не играет ключевой роли.

Уравнения Лагранжа первого рода составляют основу динамического моделирования. В систему входят уравнения, описывающие свободное движение тел, а также уравнения связей, формирующихся в кинематических парах. Также через силы, действующие в упругодемпфирующих элементах, дополнительно могут быть заданы связи.

Для упрощения численного интегрирования уравнения связей выражаются через вторые производные (связи по ускорениям). Такой подход позволяет использовать явные методы интегрирования, избегая необходимости решения нелинейных систем уравнений.

Преимущества метода:

- лёгкость формирования уравнений для систем, включающих как твёрдые, так и упругие тела;
- отсутствие жёстких ограничений на структуру расчётной схемы;
- возможность моделирования нелинейных характеристик упругих элементов;

К недостаткам относятся:

- увеличенное количество переменных (частично нивелируется диагональной структурой матрицы масс);
- проблемы с устойчивостью численных алгоритмов из-за плохой обусловленности матрицы коэффициентов связей и наличия нулевых корней в характеристическом уравнении.

В данном подходе уравнения движения системы тел имеют следующий вид:

$$\begin{cases} M\ddot{x} - D^T p = f(\dot{x}, x, t) \\ D\ddot{x} = h(\dot{x}, x), \end{cases} \quad (2.1)$$

где x – вектор обобщенных координат всей системы размерностью n ;

M – матрица инерции;

$f(\dot{x}, x, t)$ – вектор внешних сил (нагрузки, упруго-демпфирующие и гироскопические силы);

D – матрица переменных коэффициентов уравнений связей от кинематических связей размерностью $k \times n$ (k – число связей);

$h(\dot{x}, x)$ – вектор правых частей уравнений связей;

p – вектор множителей Лагранжа.

Уравнение (2.1) это одна из форм уравнений Лагранжа первого рода.

Для описания движения свободных тел используются стандартные представления. Например, движение твердого тела (Рис. 2.1) описывается в квазискоростях:

$$\begin{cases} m\ddot{S}_c = \sum_1^{k_f} F_i, \\ J\dot{\omega}_c = \sum_1^{k_f} (A^T F_i) \times r_i + \sum_1^{k_m} M_{ei}, \end{cases} \quad (2.2)$$

где $S_c (X, Y, Z)^T$ – вектор координат центра масс тела в неподвижной системе координат;

$\omega_c = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ – вектор проекций угловой скорости тела на подвижную, связанную с телом систему координат;

m и $J = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$ – диагональная матрицы масс и главных центральных моментов инерции тела;

A – ортогональная матрица поворота (ориентации) – переводит вектор, заданный в подвижной системе координат, в неподвижную систему;

F_i – трехмерный вектор внешних сил, действующих на точку, заданный в неподвижной системе координат;

M_{ei} – трехмерный вектор внешних моментов, действующих на точку, заданных в подвижной системе координат;

k_f – количество внешних сил, действующих на тело;

r_i – радиус – вектор точки приложения силы в подвижной системе координат;

k_m – количество внешних моментов.

В соответствии с представленным описанием, движение твердого тела описывается двумя типами уравнений:

- уравнениями, характеризующими вращательное движение и выраженными через проекции угловой скорости на связанную с телом систему координат;
- уравнениями, определяющими поступательное движение центра масс в глобальной системе координат;

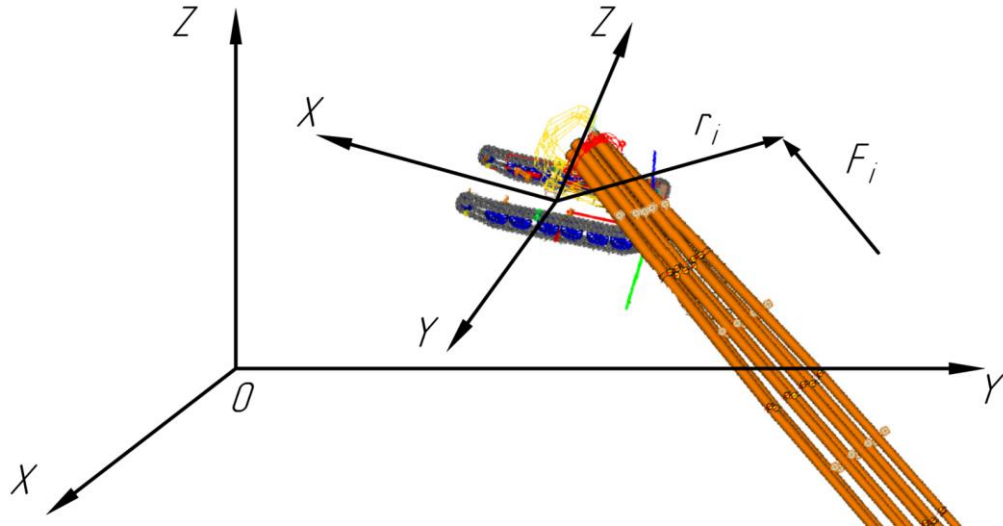


Рис. 2.1. Схема движения твердого тела в пространстве

Для двумерного случая (плоского движения) указанных уравнений достаточно для полного описания кинематики объекта.

Матрица поворота A , входящая в уравнения, может быть вычислена различными методами. Один из распространенных подходов основан на использовании кинематических уравнений Эйлера [86, 103]:

$$\begin{cases} \dot{\phi} = (\omega_x \cos(\psi) - \omega_y \sin(\psi)) / \cos(\theta); \\ \dot{\theta} = \omega_x \sin(\psi) - \omega_y \cos(\psi); \\ \dot{\psi} = (\omega_y \sin(\psi) - \omega_x \cos(\psi)) \tan(\theta) + \omega_z \end{cases} \quad (2.3)$$

где ϕ , θ , ψ – последовательные углы поворота вокруг осей x , y , z связанной с телом системы координат.

Соответствующая матрица преобразования координат имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \cos(\psi) & -\cos(\theta) \sin(\psi) & \sin(\theta) \\ \sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \cos(\phi) \sin(\psi) & -\sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) + \cos(\phi) \cos(\psi) & -\sin(\phi) \cos(\theta) \\ -\cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi) & \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) + \sin(\phi) \cos(\psi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

В качестве характерного примера рассмотрим систему из двух твердых тел, соединенных пружиной и демпфером в точках A и B (Рис. 2.2) [86]. В

процессе движения системы ориентация соединительных элементов будет непрерывно изменяться.

Для расчета характеристик упругодемпфирующего взаимодействия необходимо установить пространственное положение точек А и В в абсолютной системе координат:

$$\begin{aligned}\vec{w}_A &= \vec{s}_1 + R_1 \vec{r}_A; \\ \vec{w}_B &= \vec{s}_2 + R_2 \vec{r}_B,\end{aligned}\quad (2.5)$$

где $\vec{w}_A, \vec{w}_B$ - координатные векторы точек А и В соединения в глобальной системе координат XYZ;

$\vec{r}_A, \vec{r}_B$ - локальные радиус-векторы этих точек в системах координат $x_1y_1z_1$ и $x_2y_2z_2$, жестко связанных с телами 1 и 2 соответственно.

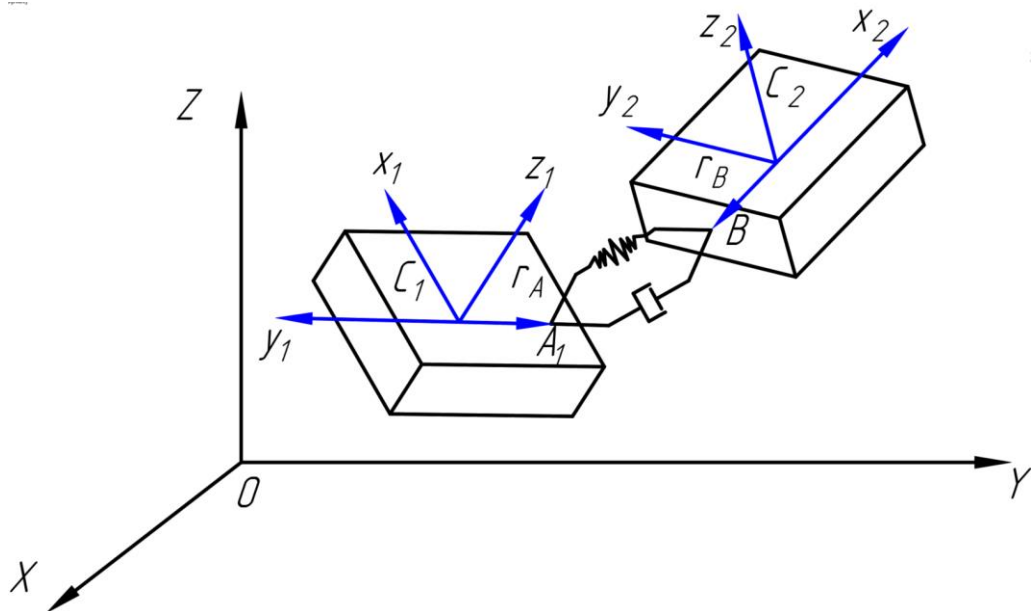


Рис. 2.2. Схема взаимодействия двух твердых тел через упруго-демпфирующий элемент

Величина деформации упруго-демпфирующего звена вычисляется по зависимости:

$$|\vec{\Delta}| = |\vec{w}_A - \vec{w}_B| - |\vec{w}_0|, \quad (2.6)$$

где $|\vec{\Delta}|$ - текущее значение деформации;

$\vec{w}_0$ - вектор начального положения упругодемпфирующего элемента в пространстве.

Сила, возникающая в упругом элементе, зависит от степени его деформации и выражается следующим соотношением:

$$|\vec{F}_p| = f_p(\Delta), \quad (2.7)$$

где $f_p(\Delta)$ - закон изменения упругой силы от величины деформации Δ ;

$|\vec{F}_p|$ - величина силы, действующей в упругом элементе.

Сила сопротивления упругого элемента (например, пружины) прямо связана с его деформацией. Чем сильнее элемент растянут или сжат, тем больше сила, стремящаяся вернуть его в исходное состояние.

Для определения направления вектора силы $\vec{F}_p$ в глобальной (неподвижной) системе координат XYZ используются направляющие косинусы вектора $\vec{w}_A - \vec{w}_B$:

$$a_x = \frac{w_{AX} - w_{BX}}{|\vec{w}_A - \vec{w}_B|}, \quad a_y = \frac{w_{AY} - w_{BY}}{|\vec{w}_A - \vec{w}_B|}, \quad a_z = \frac{w_{AZ} - w_{BZ}}{|\vec{w}_A - \vec{w}_B|}. \quad (2.8)$$

где a_x, a_y, a_z - направляющие косинусы, определяющие ориентацию вектора относительного смещения в пространстве.

Направляющие косинусы позволяют перейти от скалярной величины силы к её векторному представлению, учитывая геометрию системы.

Искомый вектор силы в глобальной системе координат вычисляется как произведение модуля силы на вектор направляющих косинусов:

$$\vec{F}_p = |\vec{F}_p| \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}. \quad (2.9)$$

Аналогичный подход применяется для расчёта диссипативной (демпфирующей) силы, которая зависит от относительной скорости точек А и В. Скорость изменения деформации определяется как:

$$\vec{\Delta} = \vec{w}_A - \vec{w}_B, \quad (2.10)$$

$$\vec{w}_A = \vec{s}_1 + R_1(\vec{\omega}_1 \times \vec{r}_A);$$

$$\vec{w}_B = \vec{s}_2 + R_2(\vec{\omega}_2 \times \vec{r}_B). \quad (2.11)$$

Эти уравнения описывают скорость точек А и В с учётом поступательного и вращательного движения связанных с ними тел.

Проекция вектора скорости $\vec{\dot{\Delta}}$ на направление относительного смещения $\vec{\Delta}$ вычисляется через направляющий косинус:

$$\dot{\Delta}_w = |\vec{\dot{\Delta}}| \cos(\alpha_w); \cos(\alpha_w) = \frac{\vec{\dot{\Delta}} \cdot \vec{\Delta}}{|\vec{\dot{\Delta}}| \cdot |\vec{\Delta}|}, \quad (2.12)$$

где α_w - угол между векторами скорости и перемещения;

$\dot{\Delta}_w$ - относительная скорость точек А и В вдоль вектора $\vec{\Delta}$.

Таким образом, величина демпфирующей силы определяется законом:

$$|\vec{F}_d| = f_d(\dot{\Delta}_w), \quad (2.13)$$

где $|\vec{F}_d|$ - величина силы в демпфирующем элементе;

$f_d(\dot{\Delta}_w)$ - зависимость силы от скорости деформации.

Демпфирующая сила пропорциональна скорости изменения деформации и направлена противоположно движению, что обеспечивает гашение колебаний.

Направление вектора диссипативной силы в неподвижной системе координат определяется аналогично упругой силе:

$$\vec{F}_d = |\vec{F}_d| \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Согласно принципу равенства действия и противодействия, силы, прикладываемые к соединенным телам, должны быть равны по модулю и противоположны по направлению.

При наличии в системе кинематических пар уравнения движения (2.1) дополняются связями, основанными на равенстве проекций ускорений сопряженных точек. Выбор системы координат для наложения связей позволяет реализовывать различные типы кинематических ограничений с требуемыми свойствами.

Для анализа динамики колесных и гусеничных трелевочных машин необходимо учитывать:

- взаимодействие между элементами ходовой системы;
- взаимодействие движителя с опорной поверхностью.

В рассматриваемом случае исследуется движение по слабodeформируемому грунту для оценки:

- максимальных эксплуатационных скоростей;
- энергетических затрат;
- параметров управляемости;
- вибрационных нагрузок.

Представленный подход обеспечивает комплексное моделирование механических систем с различными типами связей и внешних воздействий.

2.2. Математическая модель взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием

Гусеничные машины передают усилия на грунт через опорные катки и гусеничные ленты, поэтому точное моделирование этого взаимодействия критически важно для расчёта устойчивости, управляемости и нагрузок на ходовую систему. Для корректного анализа динамики гусеничной БПТМ необходимо учитывать контактное взаимодействие между движителем и опорной поверхностью (ОП).

Движение гусеничной беспилотной трелевочной машины в ходе моделирования предполагается по ровному горизонтальному основанию с малодеформируемым плотным грунтом.

Нормальные реакции грунта распределяются неравномерно – они возникают только под опорными катками, тогда как промежуточные участки гусеницы практически не нагружены [70, 36].

Для анализа прямолинейного и криволинейного движения гусеничной БПТМ разработана модель взаимодействия активного участка гусеницы (расположенного под катком) с грунтом.

Учёт разрывного характера нагрузок (только под катками) позволяет более точно смоделировать реальные условия работы гусениц. Разбиение на элементарные площадки необходимо для анализа моментов сопротивления при повороте машины.

Основные допущения модели:

- нормальные напряжения считаются равномерными по всей площади контакта;
- связь между катком и гусеницей моделируется как упруго-демпфирующая, допускающая относительное перемещение;
- каждый активный участок гусеницы аппроксимируется прямоугольной площадкой фиксированных размеров;
- для учёта момента сопротивления повороту участок разбивается на элементарные площадки;
- вектор нормали к ОП одинаков для всех элементарных площадок в пределах одного участка;
- центр опорного катка проецируется в центр активного участка гусеницы;
- касательная сила (сила трения) направлена против скорости скольжения каждой элементарной площадки;
- опорный каток воспринимает суммарную реакцию от активного участка.

Для точного расчета ориентации поверхности в каждой точке контакта применяется следующий алгоритм:

Дискретизация поверхности:

- Исследуемый участок разбивается на сетку с определенным шагом;
- По оси X создается $N_{\text{хоп}}$ узловых точек;
- По оси Y формируется $N_{\text{уоп}}$ узловых точек.

Такое разбиение позволяет перейти от непрерывной поверхности к дискретному набору точек, что существенно упрощает математические вычисления при сохранении необходимой точности моделирования.

Вычисление нормального вектора:

Для каждой точки сетки с координатами $(x_{\text{оп}i}, y_{\text{оп}j})$ определяется единичный вектор нормали по формуле:

$$\vec{n}_{\text{оп } i,j} = \frac{(\vec{r}_{i,j+1} - \vec{r}_{i,j}) \times (\vec{r}_{i+1,j} - \vec{r}_{i,j})}{|(\vec{r}_{i,j+1} - \vec{r}_{i,j}) \times (\vec{r}_{i+1,j} - \vec{r}_{i,j})|} \quad (2.15)$$

где $\vec{n}_{\text{оп } i,j}$ - искомый единичный вектор нормали;

$\vec{r}_{i,j}$ – радиус-вектор точки поверхности, имеющий компоненты:

$$\overrightarrow{r_{i,j}} = (x_{оп i} \quad y_{оп j} \quad z_{оп}(x_{оп i}, y_{оп j}))^T$$

Геометрическая интерпретация:

- Касательные векторы $(\overrightarrow{r_{i,j+1}} - \overrightarrow{r_{i,j}}) \times (\overrightarrow{r_{i+1,j}} - \overrightarrow{r_{i,j}})$ лежат в плоскости, аппроксимирующей поверхность;
- Их векторное произведение дает перпендикуляр к этой плоскости;
- Нормировка обеспечивает единичную длину вектора нормали.

Контакт гусеничного движителя (ГД) с ОП моделируется как взаимодействие прямоугольной площадки размерами L_K (длина) и B_K (ширина). Описание взаимодействия базируется на представлении об активных участках, расположенных под опорными катками (ОК) гусеничной машины.

При моделировании контакта активного участка гусеничного движителя (ГД) с плотным грунтом вводится ключевое допущение: вектор силы взаимодействия в центре активной зоны (расположенной под опорным катком) противоположен по направлению абсолютной скорости скольжения данного участка. Этот подход не только упрощает расчеты, но и обеспечивает физически обоснованное описание процесса. Интересно, что аналогичный принцип используется и при анализе взаимодействия колесных движителей с опорной поверхностью, что подтверждает его универсальность для разных типов транспортных систем. Таким образом, предложенная модель позволяет единообразно описывать динамику как гусеничных, так и колесных машин, сохраняя при этом достаточную точность расчетов.

Взаимодействие между активными участками движителя и опорной поверхностью выражается эллиптической зависимостью (Рис. 2.3 а). Расчетная схема, иллюстрирующая взаимодействие гусеницы с ОП, приведена на Рис. 2.3 б.

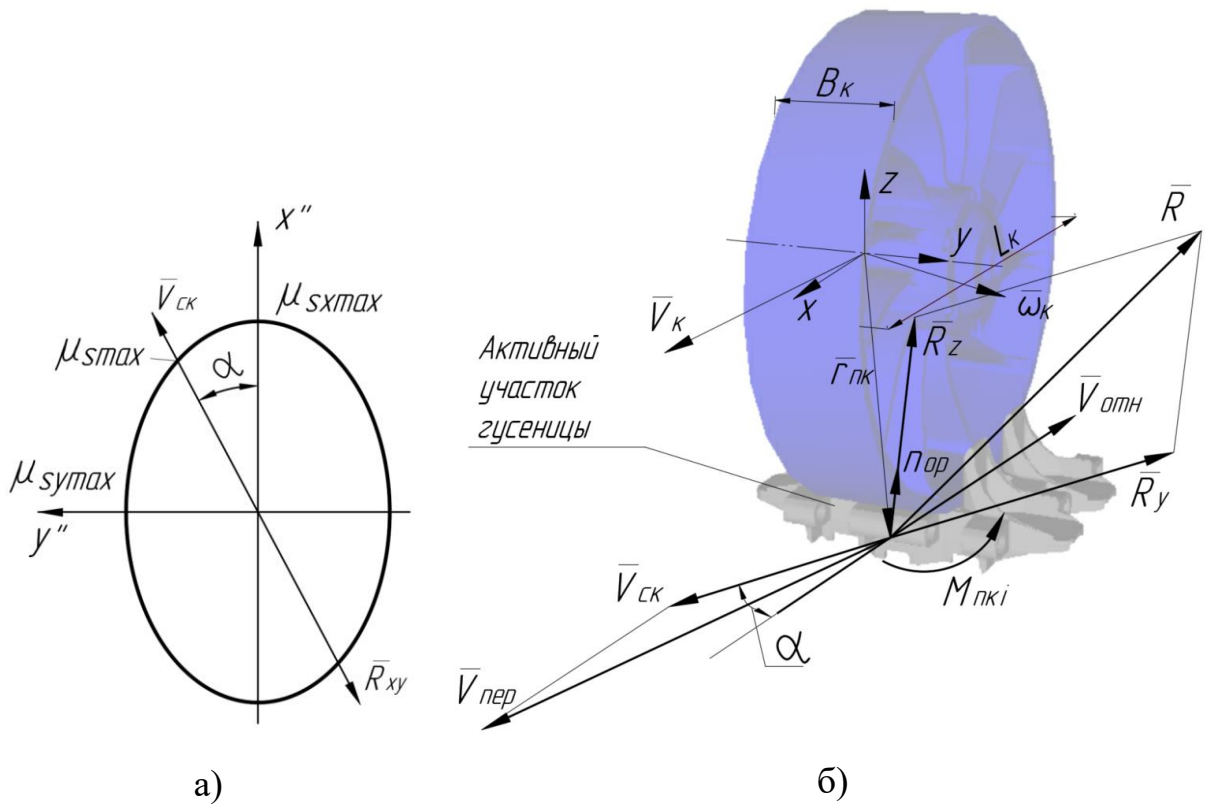


Рис. 2.3. Расчетная схема взаимодействия с опорным основанием:

а) гусеницы; б) колеса

Величину суммарной реакции в пятне контакта R определяют по зависимости:

$$R = \mu_s R_z, \quad (2.16)$$

где μ_s – коэффициент взаимодействия гусеницы с опорным основанием;
 R_z – вертикальная реакция в активном участке гусеницы.

Для несвязных оснований характерна следующая зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения:

$$\mu_s = \mu_{s\max} \left(1 - e^{-\frac{S_k}{S_0}} \right), \quad (2.17)$$

где $\mu_{s\max}$ – коэффициент взаимодействия при полном скольжении активного участка гусеницы для данного угла поворота скорости скольжения α относительно оси x'' ;

S_k – коэффициент скольжения активного участка гусеницы в зоне контакта;

S_0 – постоянная величина, влияющая на вид кривой $\mu_s(S_k)$.

Выражением (2.18) определяется коэффициент взаимодействия при полном скольжении:

$$\mu_{smax} = \frac{\mu_{sxmax}\mu_{symax}}{\sqrt{\mu_{sxmax}^2 \sin^2 \alpha + \mu_{symax}^2 \cos^2 \alpha}}, \quad (2.18)$$

где μ_{sxmax} , μ_{symax} – коэффициент сцепления в продольном и поперечном направлении (параметры эллипса трения Рис. 2.3 а);

α – угол отклонения скорости скольжения от продольной оси трака.

Вращательное движение активного участка гусеницы, которое определяется вращением корпуса и поступательным движением, вызывает возникновение момента сопротивления повороту активного участка $M_{пк}$.

$$\begin{cases} M_{пкi} = \frac{M_{пкmaxi}}{1 + 0,15 \frac{R_{пi}}{B_K}}; \\ M_{пкmaxi} = 0,375 \mu_{max} R_{zi} \sqrt{\frac{\pi L_K B_K}{4}}, \end{cases} \quad (2.19)$$

где $M_{пкi}$ – момент сопротивления повороту i -ого активного участка гусеницы, движущегося по дуге радиусом $R_{пi}$;

$M_{пкmaxi}$ – максимальный момент сопротивления повороту активного участка гусеницы при повороте на месте.

При движении гусеничной БПТМ по неровностям пути или при преодолении препятствий единичного характера взаимодействие движителя с ОО происходит не только под опорными катками (ОК), но и на других участках гусеничного обвода. Поэтому при моделировании учитываются следующие виды контактов:

- взаимодействие траков гусеницы с ОК;
- контакт траков с ведущим колесом;
- силы, возникающие между соседними траками;
- воздействие траков с ОО.

Для определения направления скорости скольжения элементарной площадки γ_i используются проекции вектора скольжения на продольную v_{ckxi} и

поперечную $v_{cкyи}$ оси активного участка. Эти проекции рассчитываются с помощью единичных векторов:

$$\cos(\alpha_i) = \frac{v_{cкxи}}{|\vec{v}_{cкl}|} = \frac{\vec{v}_{cкl}}{|\vec{v}_{cкl}|} \cdot \vec{ort}_x; \quad \sin(\alpha_i) = \frac{v_{cкyи}}{|\vec{v}_{cкl}|} = \frac{\vec{v}_{cкl}}{|\vec{v}_{cкl}|} \cdot \vec{ort}_y, \quad (2.20)$$

где $v_{cкxи}$ - проекция скорости скольжения на продольную ось; $v_{cкyи}$ - проекция скорости скольжения на поперечную ось;

$\vec{ort}_x$ - орт, определяющий продольную ось активного участка;

$\vec{ort}_y$ - орт, определяющий поперечную ось активного участка.

На основании этих данных определяется вектор силы взаимодействия i -ой элементарной площадки с ОО $\vec{R}_{\Sigma i}$ определяется как (Рис. 2.3):

$$\vec{R}_{\Sigma i} = -\mu_i |\vec{R}_{\Sigma z}| \cdot \frac{\vec{v}_{cкi}}{|\vec{v}_{cкi}|} + |\vec{R}_{\Sigma z}| \cdot \vec{n}_{op}(x_k, y_k) \quad (2.21)$$

Вектор суммарной силы взаимодействия колеса с ОО $\vec{R}_{\Sigma}$ вычисляется:

$$\vec{R}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n_{\Sigma}} \vec{R}_{\Sigma i} \quad (2.22)$$

Проекции этой суммарной силы на поперечную и продольную оси активного участка выражаются как:

$$|\vec{R}_x| = \vec{R}_{\Sigma} \cdot \vec{ort}_x, \quad |\vec{R}_y| = \vec{R}_{\Sigma} \cdot \vec{ort}_y, \quad (2.23)$$

где $|\vec{R}_x|, |\vec{R}_y|$ - продольная и поперечная составляющие реакции в плоскости активного участка гусеницы.

Момент сопротивления на ведущем колесе гусеничной БПТМ $M_{вк}$ определяется соответствующей зависимостью:

$$M_{вк} = \frac{\sum_1^{\frac{n_{ок}}{2}} (f_{гр} R_z + R_x) r_{вк}}{\eta_{гус}}, \quad (2.24)$$

где $f_{гр}$ - коэффициент сопротивления прямолинейному движению гусеничной БПТМ;

$n_{ок}$ - количество опорных катков гусеничной БПТМ.

2.3. Математическая модель взаимодействия катка с гусеничными траками

При движении опорных катков, направляющих колес и поддерживающих роликов по гусеничной цепи возникают различные силовые воздействия, которые необходимо учитывать в расчетах. К ним относятся:

- нормальные реакции – силы, действующие перпендикулярно поверхности контакта;
- силы трения – сопротивления, возникающие при относительном скольжении или качении;
- поперечные удерживающие силы – боковые воздействия, препятствующие смещению катка;
- удерживающие моменты при перекосах – моменты сил, компенсирующие отклонение катка от прямолинейного движения.

Нормальные реакции.

Для анализа контактного взаимодействия рассмотрим упрощенную схему. На Рис. 2.4 показана модель условного внедрения колеса в плоскую поверхность.

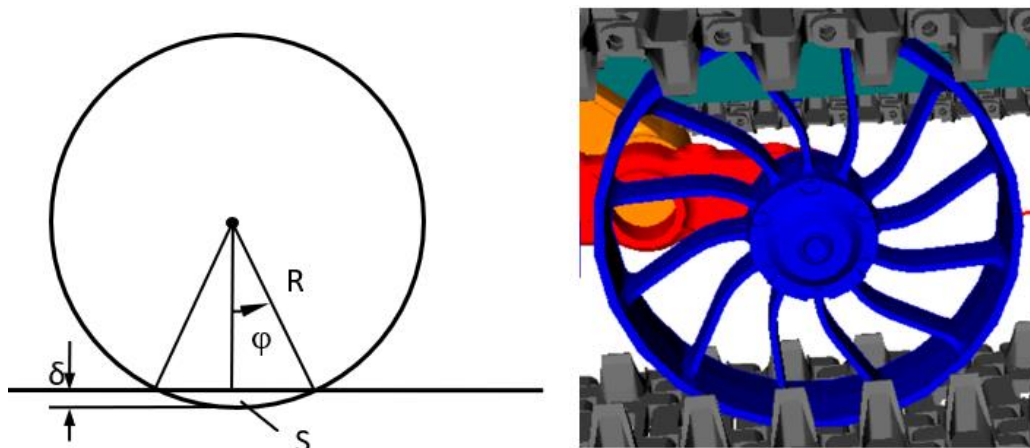


Рис. 2.4. Модель контакта колеса с плоскостью

В основе модели лежит предположение о том, что колесо обладает упругими свойствами, а его деформация в зоне контакта зависит от вертикального смещения центра. Основное допущение: контактное усилие пропорционально площади внедрения условно жесткого контура колеса в

плоскость. Эта площадь определяется величиной вертикального смещения δ центра колеса.

$$F = \kappa S, \quad (2.25)$$

В выражении (2.25) введен коэффициент пропорциональности κ , который отражает упругие характеристики колеса, а S обозначает площадь контактного пятна:

Площадь S может быть выражена через глубину внедрения δ и угол контакта φ :

$$S = \frac{2}{3} R^2 \varphi^3, \varphi = \sqrt{\frac{2\delta}{R}}. \quad (2.26)$$

Подстановка (2.26) в (2.25) дает зависимость нормальной силы от глубины внедрения:

$$F = \frac{2}{3} \kappa R^2 \varphi^3 = \frac{4}{3} \kappa \sqrt{2R} \delta^{\frac{3}{2}}. \quad (2.27)$$

Полученная степенная зависимость аналогична уравнению Герца для контактного взаимодействия упругих тел, что подтверждает физическую обоснованность модели.

Коэффициент жесткости c вычисляется как производная силы по внедрению:

$$c(\delta) = \frac{dF}{d\delta} = 2\kappa R^2 \varphi^2 \frac{d\varphi}{d\delta} = 2\kappa R \varphi = 2\kappa \sqrt{2R\delta}. \quad (2.28)$$

Это соотношение позволяет связать локальную жесткость колеса с его геометрией и упругими свойствами материала. Для инженерных расчетов удобно выразить параметры модели через статическую нагрузку P или статический прогиб δ_0 :

$$\delta_0 = \frac{3P}{2c}, \kappa = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c^3}{3PR}} \quad (2.29)$$

Дополнительно можно преобразовать выражения для силы и переменной жесткости:

$$F = P \left(\frac{\delta}{\delta_0} \right)^{\frac{3}{2}}, c(\delta) = \frac{dF}{d\delta} = c \left(\frac{\delta}{\delta_0} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.30)$$

Предложенный подход применим и для анализа взаимодействия катка с отдельным звеном гусеницы (траком). На Рис. 2.5 показана схема такого контакта.

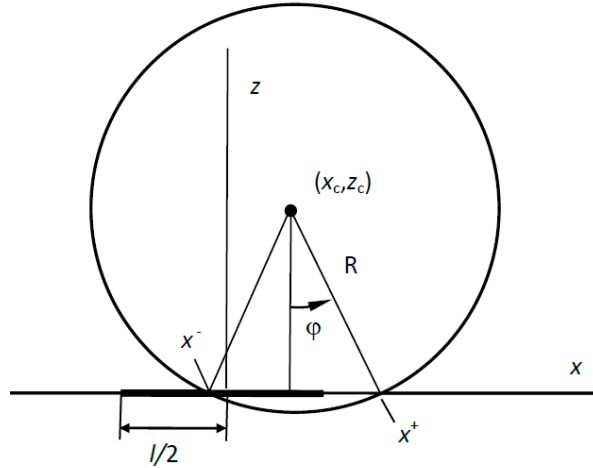


Рис.2.5. Модель контакта катка с звеном гусеницы

Основные допущения:

- нормальная реакция направлена перпендикулярно поверхности трака;
- сила пропорциональна площади внедрения колеса в зону контакта:

$$x^{\pm} = x_c \pm R \sin \varphi. \quad (2.31)$$

$$\left\{ x^- < \frac{1}{2} \right\} \cap \left\{ x^+ > -\frac{1}{2} \right\}. \quad (2.32)$$

Для удобства расчетов силу и момент рекомендуется определять в локальной системе координат с началом в центре окружности катка (Рис. 2.6).

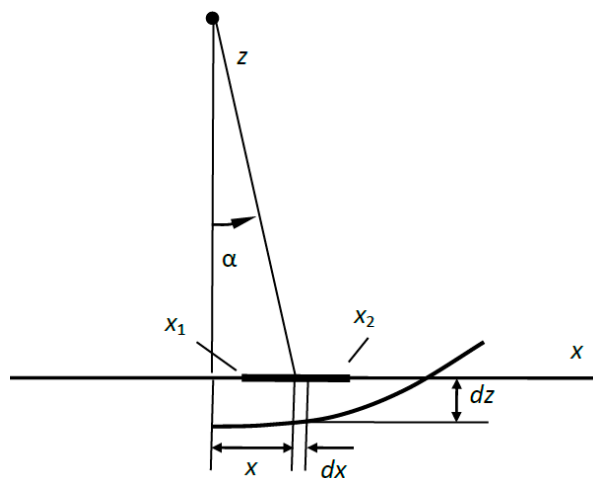


Рис. 2.6. Расчетная схема для определения площади внедрения колеса для отдельного звена

Расчетная схема (Рис. 2.6), позволяет определить площадь контактного пятна между колесом и отдельным звеном гусеничной цепи. Для математического описания процесса используем уравнение окружности:

$$dz = \left| R - \delta - \sqrt{R^2 - x^2} \right| \approx \left| R - \delta - R \left(1 - \frac{x^2}{2R^2} \right) \right| = \delta - \frac{x^2}{2R}. \quad (2.33)$$

Сила взаимодействия рассчитывается путем интегрирования давления по площади контакта:

$$\begin{aligned} dF &= \kappa dx dz, \\ F &= \kappa \int_{x_1}^{x_2} \left(\delta - \frac{x^2}{2R} \right) dx = \kappa \left(\delta x - \frac{x^3}{6R} \right) \Big|_{x_1}^{x_2}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

где границы интервала интегрирования определяются условиями:

$$\begin{aligned} x_1 &= \max \left\{ -b, -\frac{1}{2} - x_c \right\}, x_2 = \min \left\{ b, \frac{1}{2} - x_c \right\}, \\ b &= \sqrt{2R\delta}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

При малых значениях внедрения δ полученная формула сводится к известному решению для контакта с плоской поверхностью, что подтверждает корректность математического аппарата.

Для нахождения точки приложения силы вычислим момент сил относительно начала координат:

$$dM = x dF = \kappa x dx dz, \quad (2.36)$$

$$M = \kappa \int_{x_1}^{x_2} \left(\delta x - \frac{x^3}{2R} \right) dx = \kappa \left(\frac{\delta x^2}{2} - \frac{x^4}{8R} \right) \Big|_{x_1}^{x_2}, \quad (2.37)$$

Координата точки приложения равнодействующей:

$$x^* = \frac{M}{F} + x_c. \quad (2.38)$$

x_c учитывает смещение центра контактной площадки. Данный подход позволяет точно определить распределение нагрузок.

Удерживающие силы и момент.

На Рис. 2.7 показана схема для расчета сил, предотвращающих поперечное смещение гусеницы. В системе предусмотрены два основных стабилизирующих фактора:

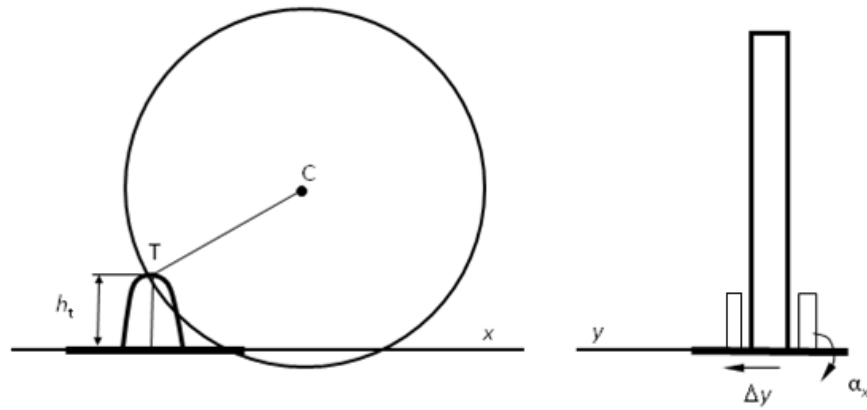


Рис. 2.7. Расчетная схема для определения удерживающей силы и момента

Поперечная удерживающая сила:

$$F_y = -c_y \Delta y - d_y \dot{\Delta y}; \quad (2.39)$$

Стабилизирующий момент:

$$M_x = -c_{\alpha_x} \alpha_x - d_{\alpha_x} \dot{\alpha}_x, \quad (2.40)$$

где Δy – поперечное смещение звена;

α_x – угол поворота звена;

$\dot{\alpha}_x$ – угловая скорость звена относительно плоскости колеса (Рис. 2.5);

c_y, d_y – коэффициенты жесткости и демпфирования;

$c_{\alpha_x}, d_{\alpha_x}$ – угловые коэффициенты жесткости и демпфирования.

Условием возникновения силы и момента является вход в контакт гребня звена с катком, выражаемый условием

$$TC < R, \quad (2.41)$$

где T – высшая точка гребня звена, положение которой задается высотой h_t гребня (Рис. 2.6);

R – радиус колеса.

Пользователь задает:

- коэффициент поперечной жесткости c_y ;
- коэффициент демпфирования β_y ;
- высоту гребня h_t .

Остальные параметры система рассчитывает автоматически, обеспечивая комплексный учет всех факторов взаимодействия.

$$d_y = 2\beta_y \sqrt{m_l c_y}, c_{ax} = c_y l^2, d_{ax} = 2\beta_y \sqrt{J_{lx} c_{ay}}, \quad (2.42)$$

где m_l, l, J_{lx} – масса, длина и момент инерции трака относительно продольной оси.

Для учета взаимодействия трака с ОО используется контактная точка, расположенная в центре переднего ребра трака. (Рис. 2.8).

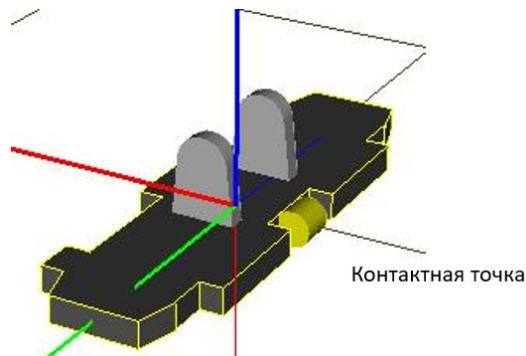


Рис. 2.8. Контактная точка трака

Если зазор между точкой и поверхностью положительный, силы отсутствуют.

При нулевом или отрицательном зазоре возникают:

- нормальная реакция R_z ,
- касательная реакция R_{xy} (трение).

Анализируются типы зацепления ведущего колес: гребневое, цевочное, зубовое.

Для передачи тяговых и тормозных усилий реализована модель податливого контакта с трением, учитывающая геометрию зубьев звездочки и цевки.

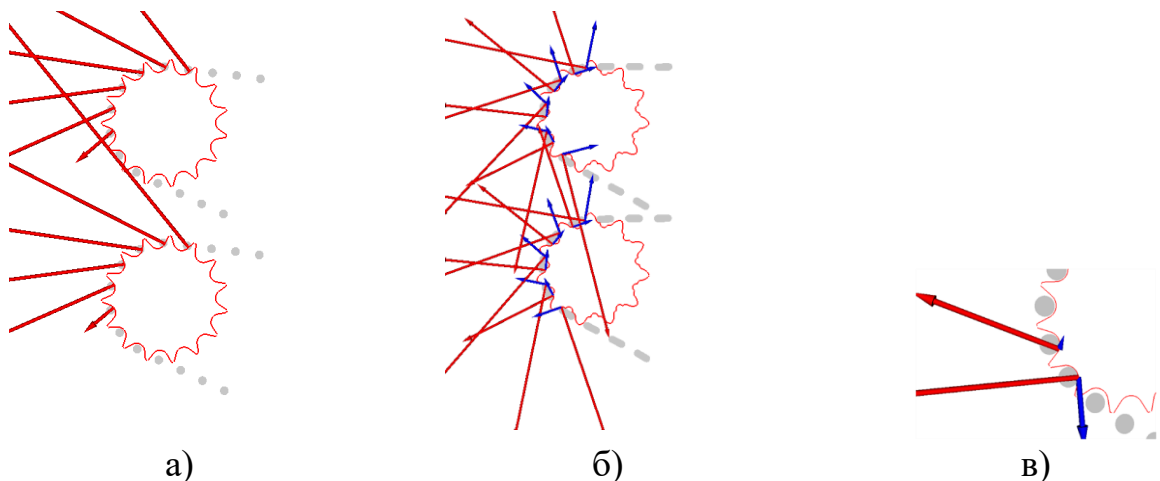


Рис. 2.9. Модель контакта:

а) цевочное, б) гребневое, в) зубовое зацепление.

При контакте профиля цевки с зубом гусеницы возникают следующие силовые компоненты:

1) Нормальная составляющая (N):

- Направлена перпендикулярно поверхности контакта;

Зависит от двух ключевых параметров:

- Глубины внедрения профиля;
- Скорости процесса внедрения.

2) Касательная сила трения (F):

- Действует параллельно поверхности контакта;
- Определяется коэффициентом трения и величиной нормальной силы.

Представленная модель силового взаимодействия имеет аналогию с контактными процессами между точкой трака и опорной поверхностью (ОП). Это позволяет использовать схожие математические подходы для описания обоих видов взаимодействий.

2.4. Математическая модель динамики беспилотных трелевочных машин для хлыстовой заготовки как системы твердых тел

2.4.1. Математическая модель динамики гусеничной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом

В данном разделе представлена математическая модель, описывающая движение гусеничной беспилотной трелевочной машины (БПТМ), оснащенной пачковым захватом. Модель была разработана с применением современных программных средств, предназначенных для автоматизированного анализа динамики многокомпонентных механических систем [101, 102].

При создании математических моделей динамики как колесных, так и гусеничных БПТМ учитывались специфические требования и ограничения, накладываемые программными комплексами. В связи с этим введен ряд допущений, направленных на оптимизацию вычислительных процессов без существенной потери точности расчетов:

- 1) масса и геометрия тел в процессе моделирования не изменяется, моделируемые тела являются твердыми (недеформируемыми);

2) действующие на тела силы и моменты известны в каждый момент времени (могут быть вычислены);

3) шарниры являются «идеальными», то есть податливость и потери в них отсутствуют;

4) начальные условия определены и соответствуют кинематическим ограничениям, наложенным на тела системы.

Разработанная модель состоит из функциональных подсистем, которые соответствуют различным узлам гусеничной БПТМ: корпус БПТМ, технологическое оборудование (пачковый захват с колонной и толкатель) и, два гусеничных модуля, силовая установка и система управления движением и контроля параметров.

На Рис. 2.10 представлена геометрическая интерпретация разработанной математической модели гусеничной БПТМ с технологическим оборудованием типа «пачковый захват» с указанием шарниров и центров масс.

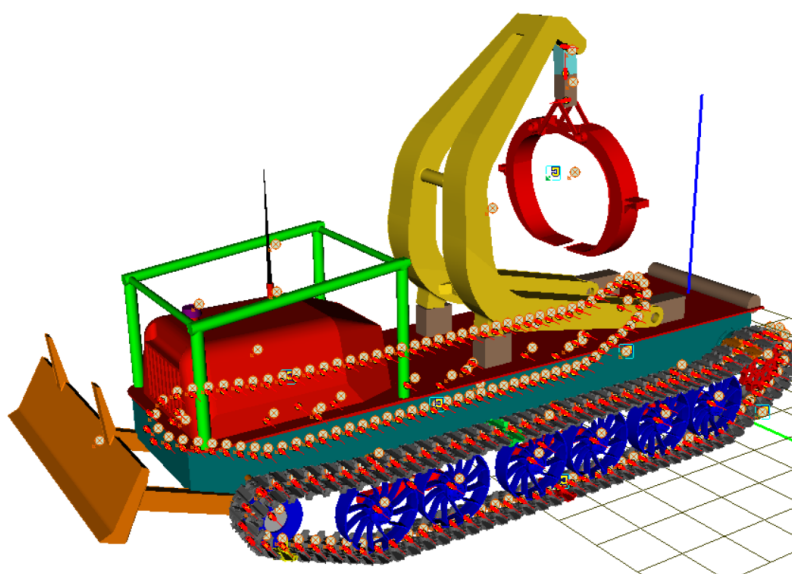


Рис. 2.10. Динамическая модель гусеничной БПТМ с пачковым захватом с указанием шарниров и центров масс

Разработанная модель БПТМ включает в себя совокупность взаимосвязанных подсистем и узлов машины:

- корпус — основа конструкции, определяющая инерционные и геометрические характеристики;
- технологическое оборудование — в данном случае пачковый захват и толкатель, обеспечивающие выполнение целевых операций;

- движитель – гусеничная система, отвечающая за перемещение машины;
- силовая установка – источник энергии, приводящий машину в движение;
- системы управления и контроля – обеспечивают стабилизацию движения и мониторинг рабочих параметров.

На Рис. 2.11 представлена обобщенная схема динамической модели гусеничной БПТМ, отражающая взаимодействие указанных подсистем.

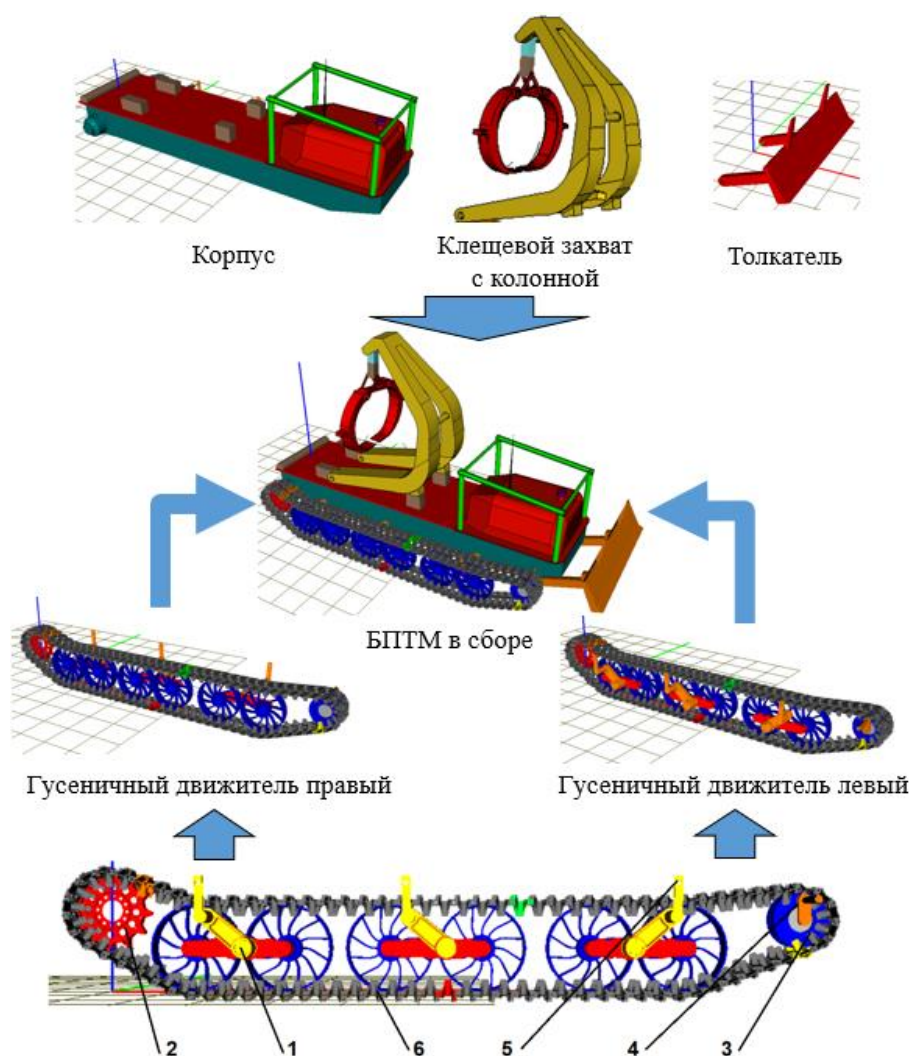


Рис. 2.11. Структура динамической модели гусеничной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом: 1 - каретка с 2-мя опорными катками; 2 - ведущее колесо; 3 - натяжной каток; 4 - направляющий элемент устройства натяжения; 5 - упругий элемент; 6 - трак гусеницы

По упрощенной геометрической модели с равномерно распределенной по объему массой вычисляются моменты инерции. Корпус БПТМ, а также

технологическое оборудование состоит из тел, которые жестко связаны друг с другом.

Ходовая система гусеничной БПТМ содержит на каждый борт машины по три баланsirные двухкатковые каретки подвески, баланsirы катков, которые кинематически связаны с рамой машины и с гидроцилиндрами, штоковая и поршневая полости которых по параллельной схеме гидравлически соединены с гидросистемой машины.

На Рис. 2.12 представлена упрощенная модель баланsirной двухкатковой каретки подвески.

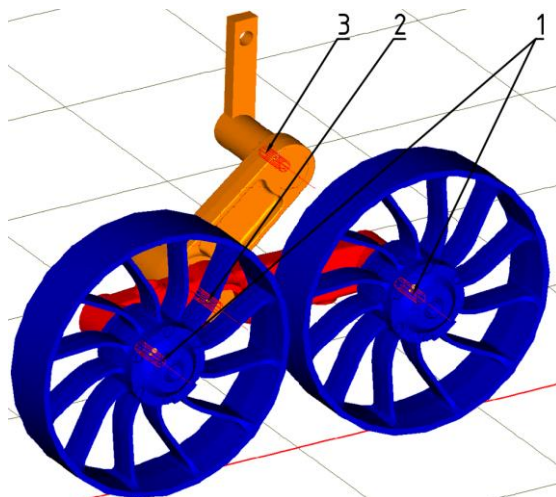


Рис. 2.12. Тела модели и шарниры баланsirной двухкатковой каретки подвески

Принято, что все каретки имеют одинаковое конструктивное исполнение и упруго-демпфирующие характеристики. Опорные катки каждого борта машины установлены шарнирно (1) на баланsirе. Балансир вращательным шарниром (2) связан с рычагом, сам рычаг связан с корпусом машины через вращательный шарнир (3).

Ведущее колесо и направляющий каток имеют вращательные шарниры. Гусеничный обвод собран из системы жестких тел (траков), которые связаны между собой силовой упруго-демпфирующей связью с линейными характеристиками.

Расположение центров тяжести тел в модели машины с пачковым захватом соответствует данным, приведенным в Главе 1.

Элементы, входящие в гусеничный движитель БПТМ с пачковым захватом, представлены в Таблице 13 с описанием их массы и количества.

Таблица 13.

Элементы гусеничного движителя БПТМ с пачковым захватом

№	Название	Кол-во, шт.	Масса, кг.
1	Каретка с 2-мя опорными катками	3	338х3
	Опорный каток	6	100
	Балансир	3	65
	Рычаг	3	73
2	Ведущее колесо	1	100
3	Натяжной каток	1	100
4	Направляющий элемент устройства натяжения	1	10
5	Упругий элемент	3	10
6	Трак гусеницы	86	10

Визуализация разработанной динамической модели гусеничной БПТМ с пачковым захватом и пачкой хлыстов приведена на Рис 2.13.

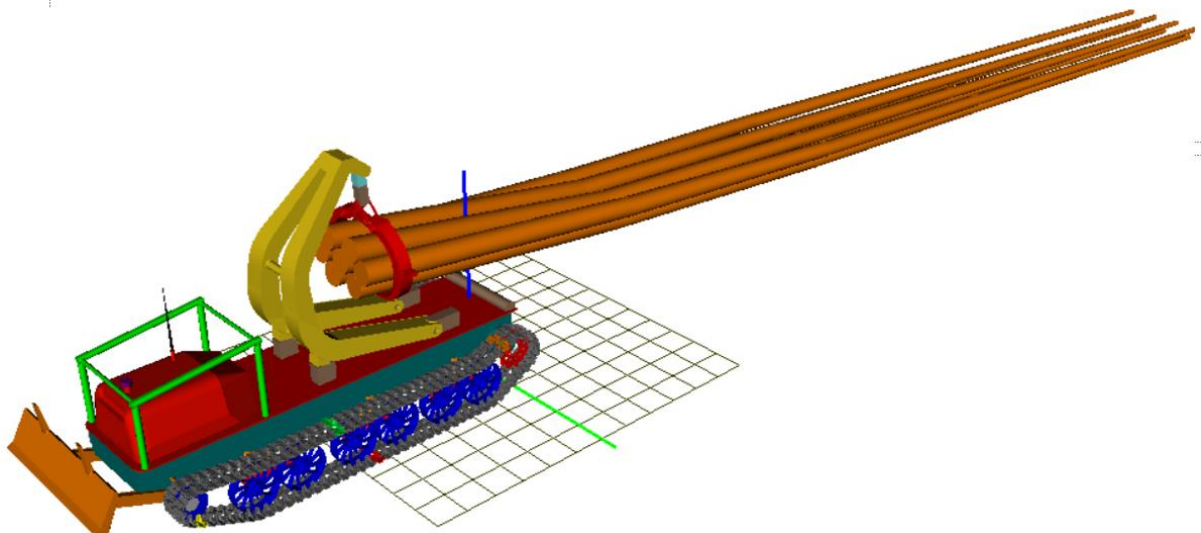


Рис. 2.13. Динамическая модель гусеничной БПТМ с пачковым захватом и пачкой хлыстов

2.4.2. Математическая модель динамики гусеничной беспилотной трелевочной машины с манипулятором и самозажимным коником

В данном разделе рассматривается математическая модель, описывающая динамические характеристики гусеничной БПТМ, оборудованной манипулятором и самозажимным коником. Разработка модели осуществлялась с применением специализированного программного обеспечения, предназначенного для компьютерного моделирования динамики сложных механических систем.

При создании данной математической модели были сохранены все основные допущения, принятые ранее для модели гусеничной БПТМ с пачковым захватом. Это обеспечивает:

- согласованность методологических подходов;
- сравнимость результатов исследований;
- единство вычислительных алгоритмов.

Разрабатываемая модель учитывает:

- взаимодействие гусеничного движителя с опорной поверхностью;
- динамику работы манипулятора;
- особенности функционирования самозажимного коника;
- взаимовлияние всех элементов конструкции.

Аналогично гусеничной БПТМ с пачковым захватом разработанная модель гусеничной БПТМ с манипулятором и самозажимным коником состоит из функциональных подсистем, которые соответствуют различным узлам гусеничной БПТМ и системам: корпус машины, технологическое оборудование (манипулятор, самозажимной коник и толкатель), движитель, силовая установка и системы управления движением и контроля параметров.

На Рис. 2.14 представлена геометрическая интерпретация разработанной математической моделей гусеничной БПТМ с манипулятором и самозажимным коником с указанием шарниров и центров масс.

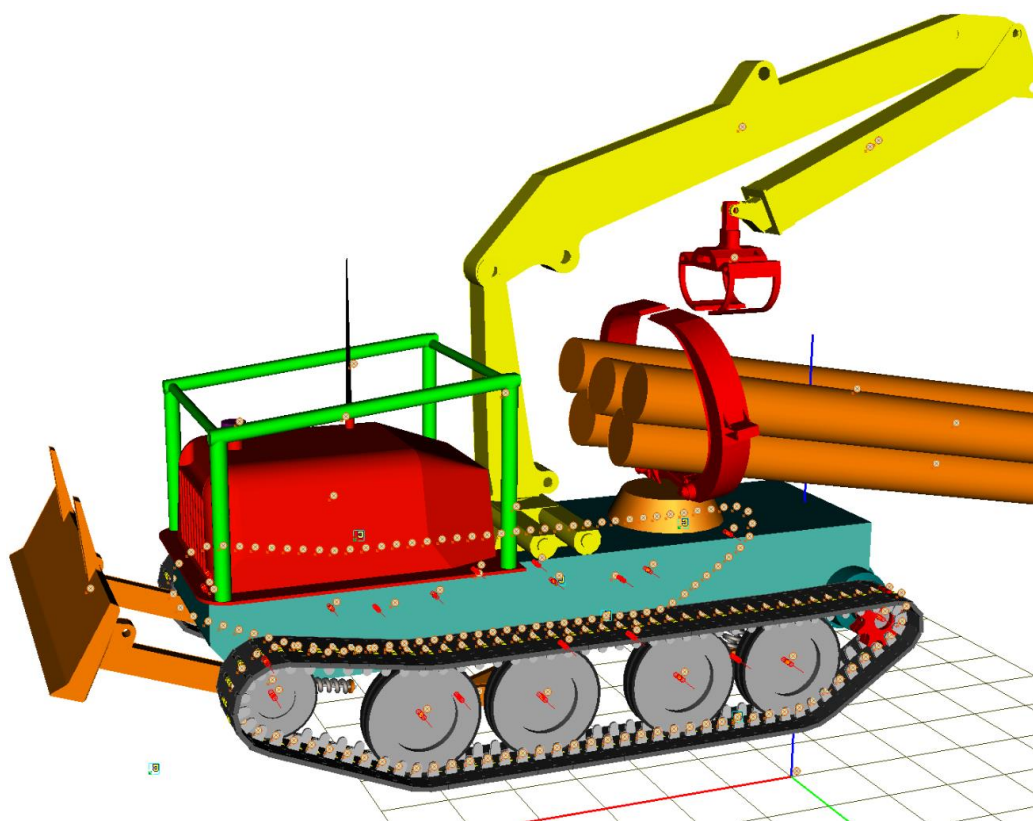


Рис. 2.14. Динамическая модель гусеничной БПТМ с манипулятором и самозажимным коником с указанием шарниров и центров масс

На Рис. 2.15 приведена структура динамической модели гусеничной БПТМ с манипулятором и самозажимным коником по различным подсистемам. Модели включают в себя подсистемы: корпус машины, технологическое оборудование (манипулятор, самозажимной коник и толкатель), пачку хлыстов, два гусеничных модуля, которые, в свою очередь, состоят из подсистем гусеничных двигателей и подвесок опорных катков.

Моменты инерции тел вычисляются по упрощенной геометрической модели с равномерно распределенной по объему массой. Корпус, технологическое оборудование и МТО состоят из тел, которые жестко связаны друг с другом.

Принято, что подвески всех опорных катков имеют одинаковое конструктивное исполнение и упругодемпфирующие характеристики. Опорные катки каждого борта ГБПТМ установлены шарнирно на балансирах (1), балансир вращательным шарниром связан с рычагом (2), который связан с корпусом через

вращательный шарнир (3), упругим элементом в каретке является пружина (Рис. 2.16).

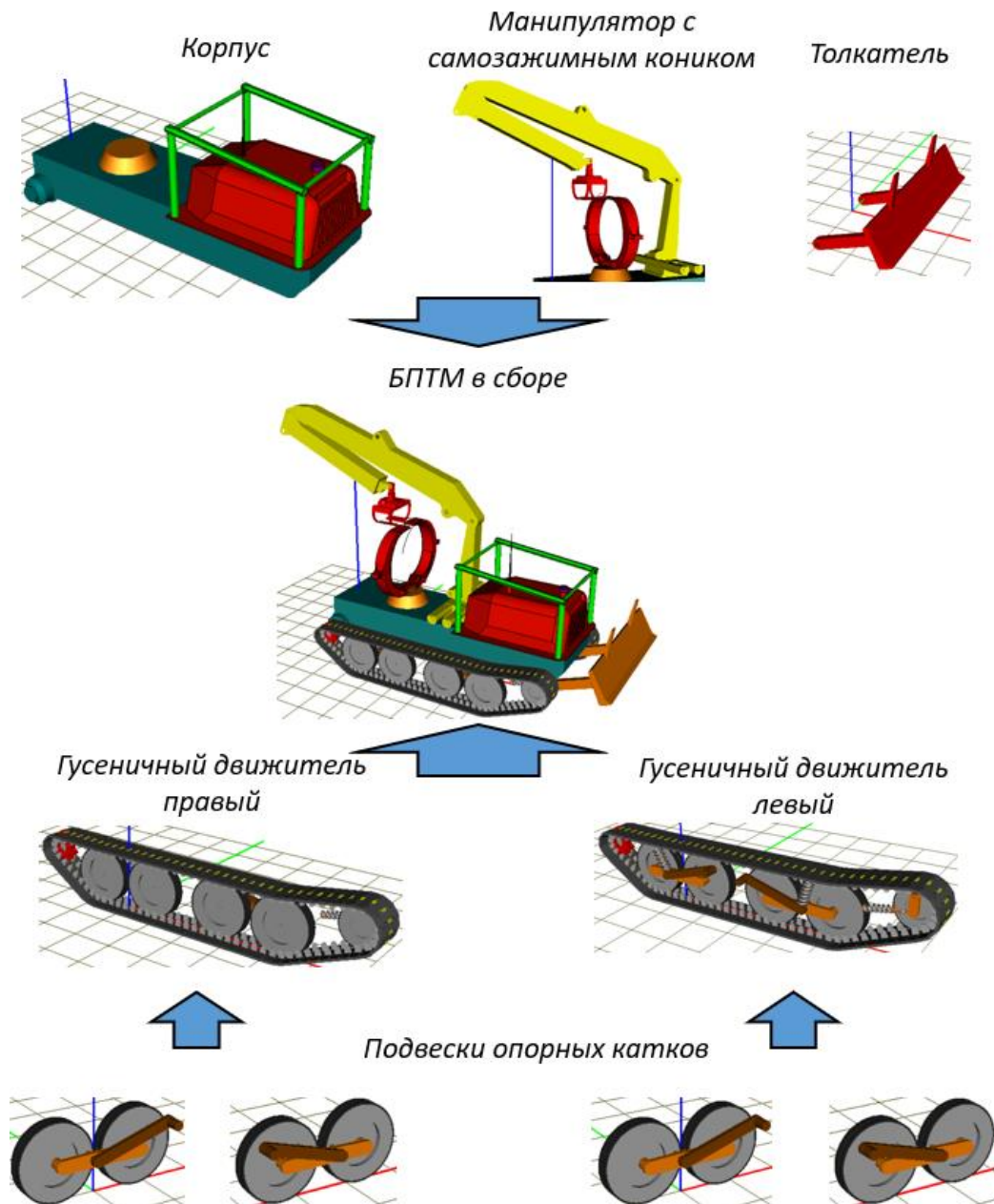


Рис. 2.15. Структура динамической модели гусеничной БПТМ с манипулятором и самозажимным коником

Модель гусеничного движителя ГБПТМ включает в себя подсистемы опорных катков с подвесками, траки гусеницы, механизм натяжения с направляющим катком и ведущее колесо.

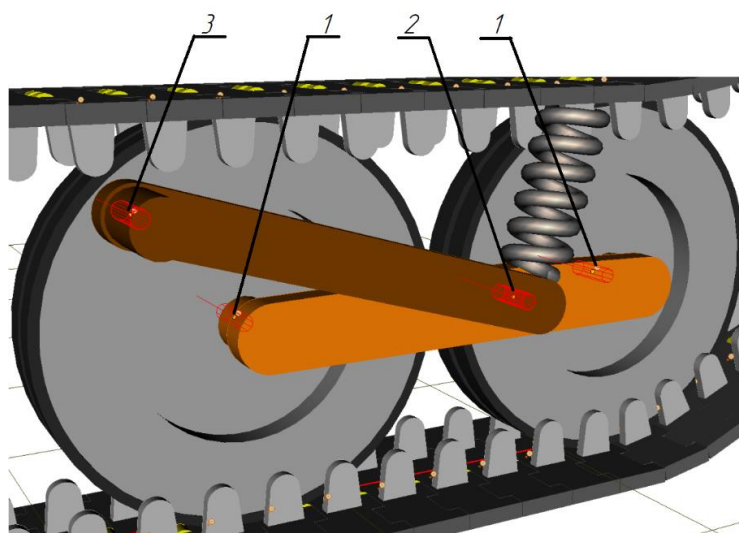


Рис. 2.16. Модель упруго-рычажно-балансиной подвески

На Рис. 2.17 представлена модель гусеничного движителя четырёхкатковой БПТМ с манипулятором и самозажимным коником.

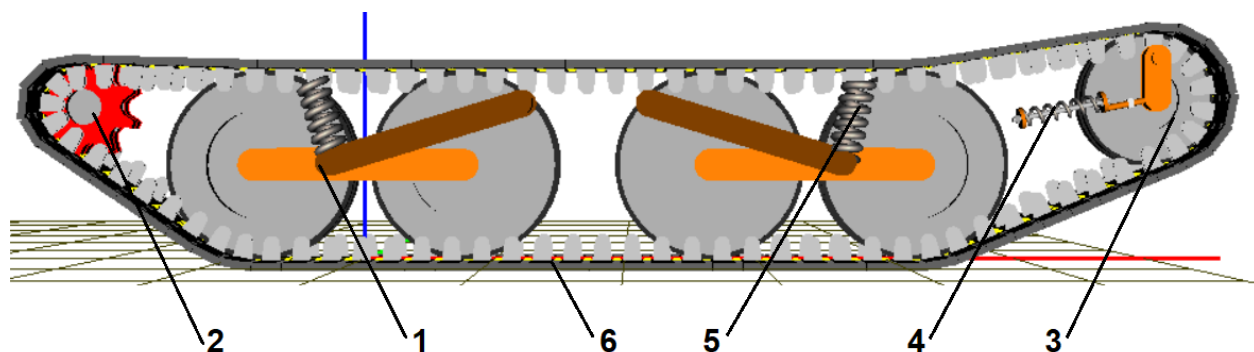


Рис. 2.17. Тела модели гусеничного движителя БПТМ с манипулятором и самозажимным коником

В Таблице 14 приведен перечень тел, представленных на Рис. 2.17, которые используются в модели гусеничного движителя БПТМ с манипулятором и самозажимным коником.

Ведущее колесо и направляющий каток имеют вращательные шарниры. Гусеничный обвод собран из системы жестких тел (траков), которые связаны между собой силовой упруго-демпфирующей связью с линейными характеристиками.

Расположение центров тяжести тел в модели машины, оснащенной манипулятором и самозажимным коником, соответствует данным, приведенным в Главе 1.

Элементы гусеничного движителя БПТМ с пачковым захватом (один борт машины)

№	Название	Кол-во, шт.	Масса, кг.
1	Каретка с 2-мя опорными катками	2	275x2
	Опорный каток	4	90
	Балансир	2	55
	Рычаг	2	40
2	Ведущее колесо	1	75
3	Натяжной каток	1	65
4	Направляющий элемент устройства натяжения	1	10
5	Упругий элемент каретки	1	10
6	Трак гусеницы	85	6

Визуализация разработанной динамической модели гусеничной БПТМ, оснащенной манипулятором с самозажимным коником, а также пачкой хлыстов приведена на Рис.2.18.

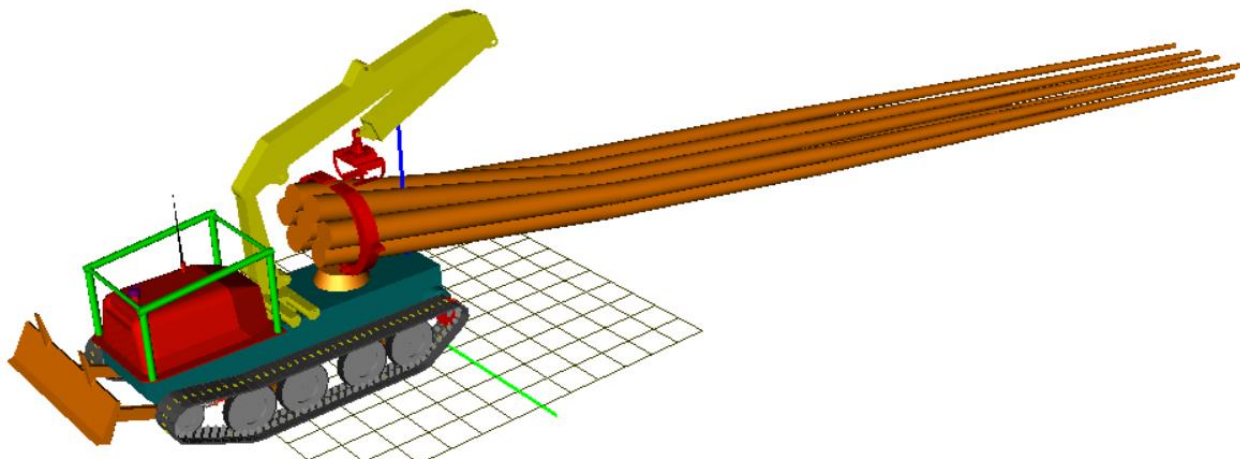


Рис. 2.18. Динамическая модель гусеничной БПТМ, оснащенной манипулятором с самозажимным коником и пачкой хлыстов

2.4.3. Математическая модель динамики колесной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом

В настоящее время большое распространение получили и специализированные лесные колесные тягачи с шарнирно-сочлененной рамой,

состоящей из двух секций, соединенных шарниром, обеспечивающим взаимный поворот секций в плане и относительно продольной горизонтальной оси.

Рассмотрим математическую модель динамики шарнирно-сочлененной колесной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом, разработанную с использованием программных комплексов автоматизированного моделирования динамики систем тел.

В разделе 2.4.1 представлены принятые допущения при разработке математической модели.

На Рис. 2.19 представлена структурная схема разработанной математической модели колесной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом.

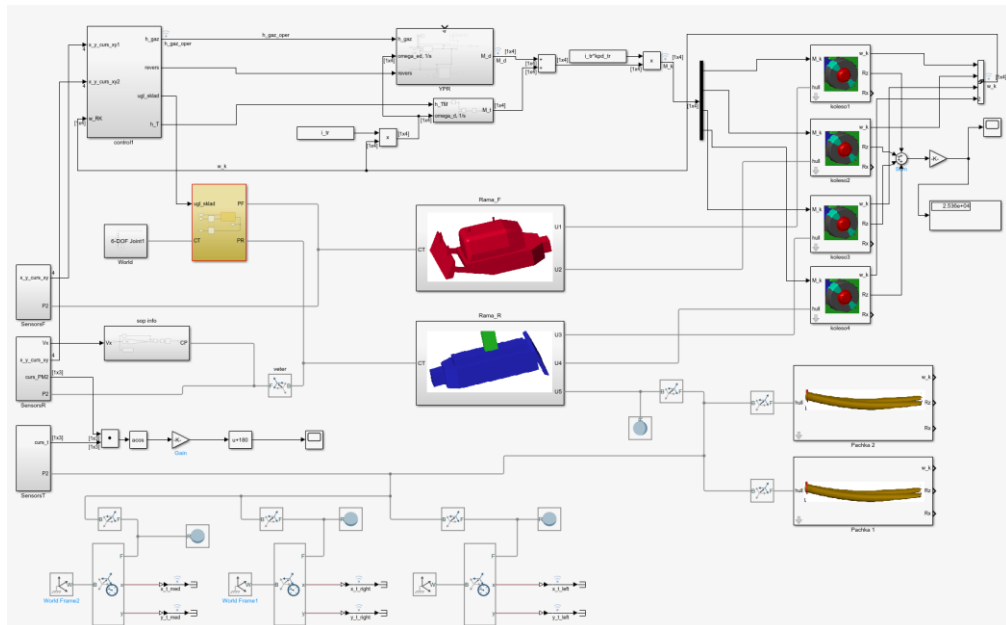


Рис. 2.19. Структурная схема математической модели колесной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом

Разработанная модель состоит из функциональных подсистем, которые соответствуют различным узлам колесной машины: корпус машины, технологическое оборудование (пачковый захват с колонной и толкатель), колесный движитель, силовая установка и система управления движением и контроля параметров.

На Рис. 2.20 представлена геометрическая интерпретация разработанной математической модели колесной БПТМ с технологическим оборудованием типа «пачковый захват» с указанием шарниров и центров масс.

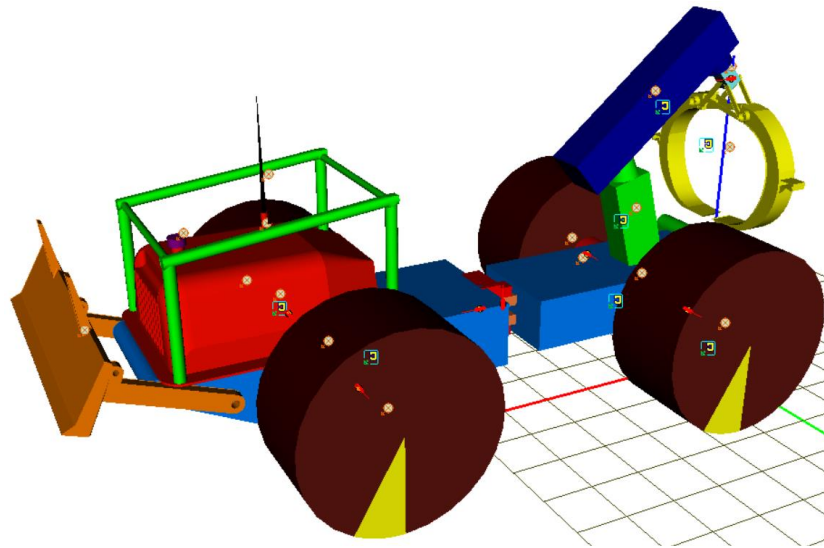


Рис. 2.20. Динамическая модель колесной БПТМ с пачковым захватом с указанием шарниров и центров масс

В разработанной математической модели координаты центров тяжести всех конструктивных элементов колесной БПТМ, оснащенной пачковым захватом, были приняты в полном соответствии с расчетными и экспериментальными данными, представленными в первой главе.

На Рис. 2.21 представлены геометрическая интерпретация разработанной математической модели колесной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом и пачкой хлыстов.

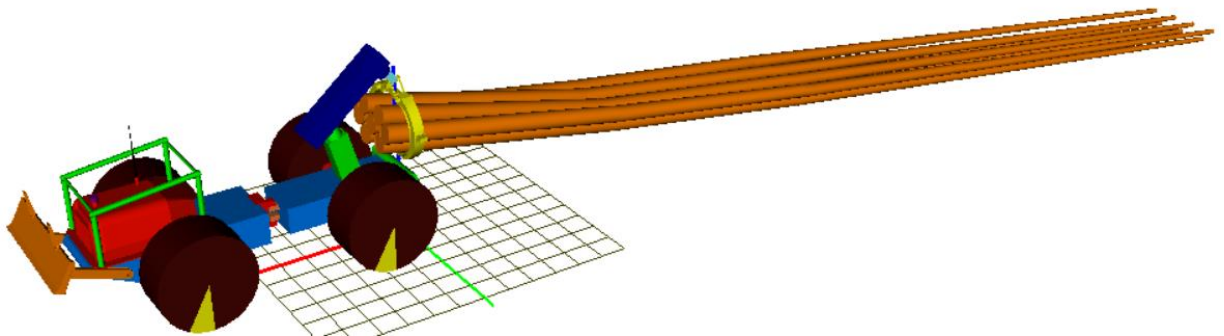


Рис. 2.21. Динамическая модель колесной БПТМ с пачковым захватом и пачкой хлыстов

2.5. Математическая модель динамики беспилотных трелевочных машин для сортиментной заготовки как системы твердых тел

2.5.1. Математическая модель динамики гусеничной беспилотной погрузочно-транспортной машины с полуприцепом

В данном разделе представлена разработанная математическая модель, описывающая динамические характеристики гусеничной погрузочно-транспортной машины (ПТМ), работающей в комплексе с полуприцепом. Моделирование выполнено с использованием современных программных комплексов, специализированных на анализе динамики сложных механических систем [96].

При разработке модели применен единый комплекс допущений, ранее обоснованный в разделе 2.4.1 для аналогичных транспортных систем.

Разрабатываемая модель гусеничной БПТМ в части машины схожа с моделью гусеничной БПТМ, оснащенной манипулятором и самозажимным коником, представленной в Разделе 2.4.2. Основные отличия заключаются в отсутствии самозажимного коника, предназначенного для трелевки деревьев (хлыстов), а на его месте установлен шарнир, связывающий БПТМ и полуприцеп, оснащенный кониками для трелевки сортиментов.

В качестве исследуемого объекта была выбрана погрузочно-транспортная гусеничная машина (сортиментовоз) Онежского тракторного завода модели ТБ-1М-16, представленная на Рис. 2.22.



Рис. 2.22. Погрузочно-транспортная гусеничная машина (сортиментовоз) ТБ-1М-16

Разработанная модель состоит из функциональных подсистем, которые соответствуют различным узлам беспилотной гусеничной трелевочной машины: корпус машины с технологическим оборудованием, корпус полуприцепа, два гусеничных модуля, два колесных модуля, силовая установка и система управления движением и контроля параметров [96].

На Рис. 2.23 представлена визуализация разработанной динамической модели гусеничной беспилотной трелевочной машины.

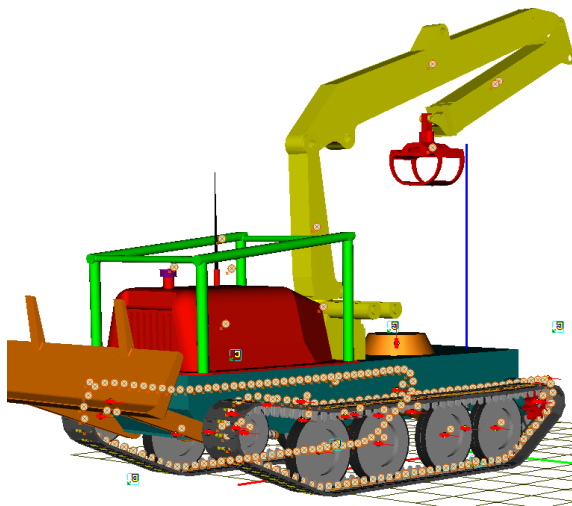


Рис. 2.23. Динамическая модель гусеничной беспилотной трелевочной машины
Структурные элементы движителя представлены в Разделе 2.4.2.

Модель колесного движителя полуприцепа включает в себя два колеса (не ведущие), шарнирно установленных на балансирах, который вращательным шарниром связан с корпусом полуприцепа (Рис. 2.24, б).

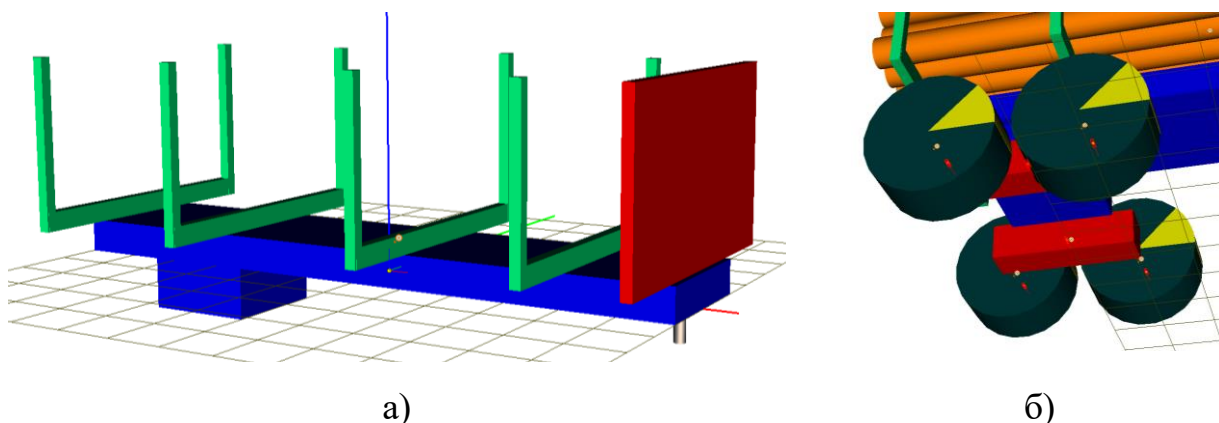


Рис. 2.24. Структурные элементы движителя колесного полуприцепа гусеничной беспилотной ПТМ: а – кониковая площадка полуприцепа; б – колесный движитель полуприцепа

По упрощенной геометрической модели вычисляются моменты инерции тел с равномерно распределенной по объему массой. Корпус гусеничной БПТМ и МТО, а также кониковая площадка полуприцепа с сортиментами состоят из тел, которые жестко связаны друг с другом.

Моделировался узел сочленения с помощью трех взаимноперпендикулярных упруго-демпфирующих силовых связей с линейными характеристиками, имитирующими сферический шарнир.

На Рис. 2.25 представлена визуализация разработанной динамической модели гусеничной беспилотной ПТМ и полуприцепа с сортиментами.

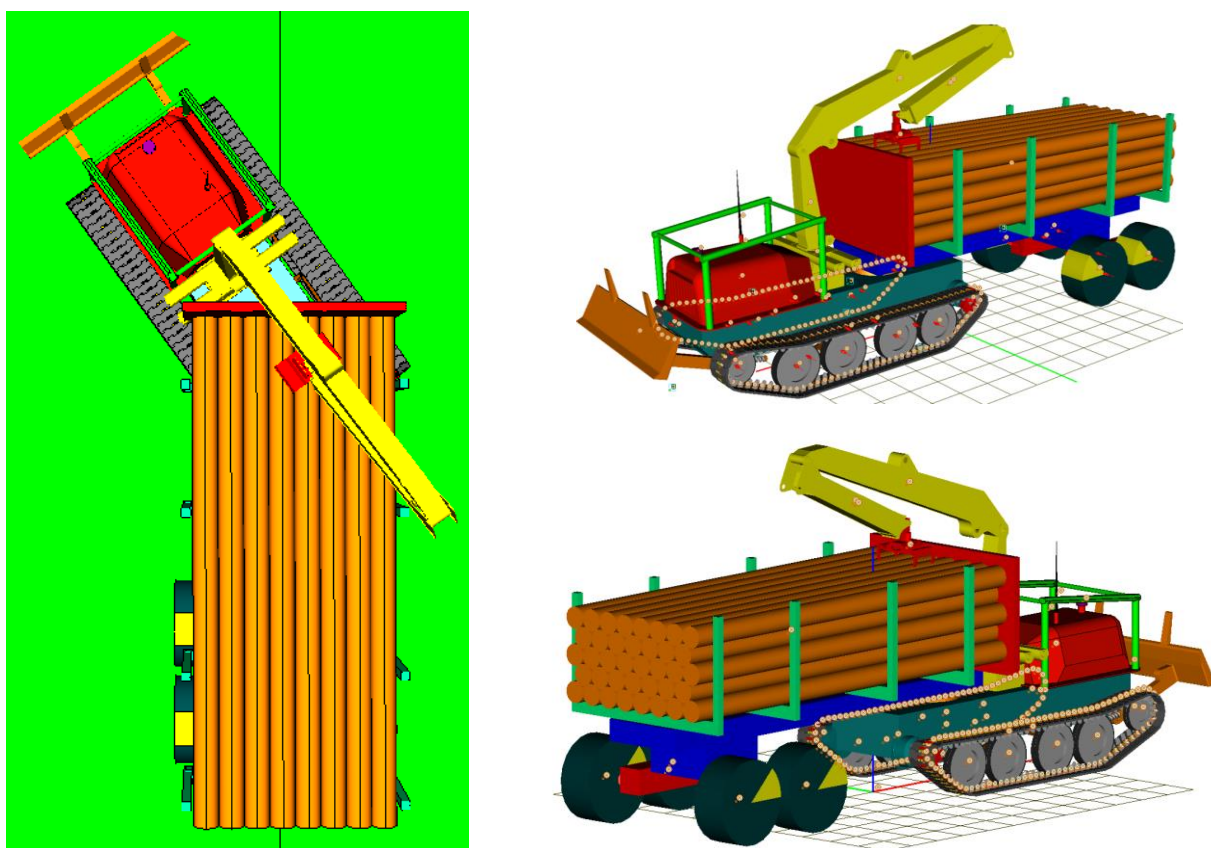


Рис.2.25. Динамическая модель гусеничной ПТМ и полуприцепа с сортиментами

Общая масса трелюемого пачки сортиментов составила 8246 кг., а их длина 6 метров.

2.5.2. Математическая модель динамики колесной беспилотной погрузочно-транспортной машины

В данном разделе исследуется математическая модель, описывающая динамику колесной беспилотной погрузочно-транспортной машины (ПТМ) с

формулой 8×8 , построенной по шарнирно-сочлененной компоновочной схеме [97]. Во время разработки математической модели были приняты следующие допущения:

- объекты моделирования твердые и недеформируемые;
- все силы и моменты, действующие на каждое тело, известны;
- в шарнирах отсутствует податливость и потери.

Разработанная модель состоит из функциональных подсистем, которые соответствуют различным узлам колесной машины: передней и задней полурам, коников, защитного ограждения, манипулятора, пачки сортиментов длиной 6м, колесных движителей, силовая установка и система управления движением и контроля параметров. На Рис. 2.26 представлена геометрическая интерпретация разработанной математической модели колесной беспилотной погрузочно-транспортной машины ПТМ.

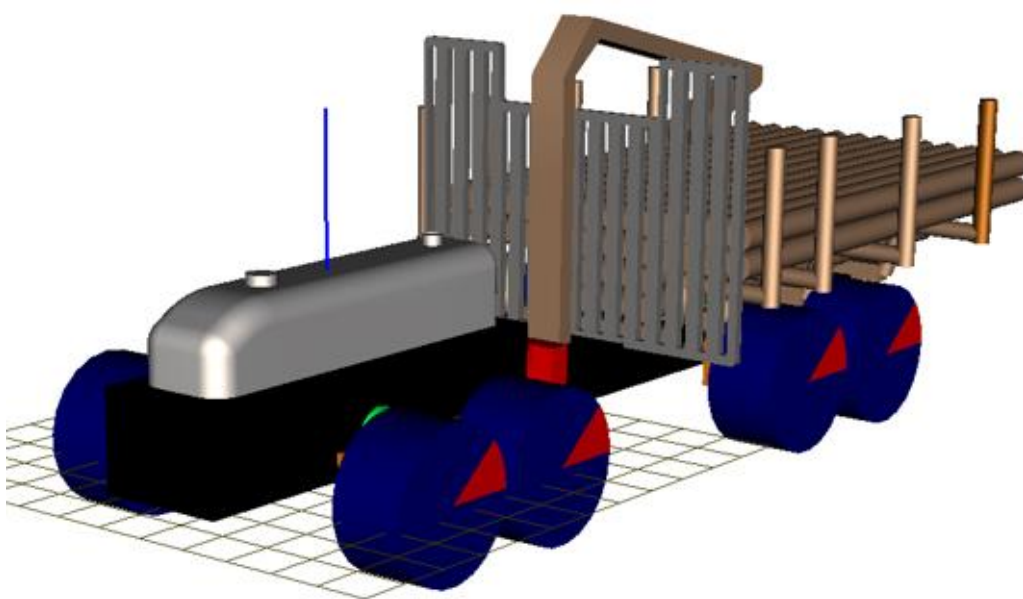


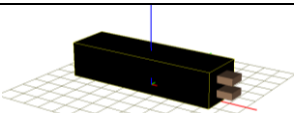
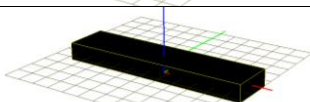
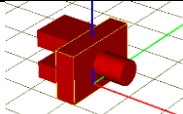
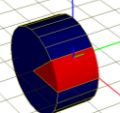
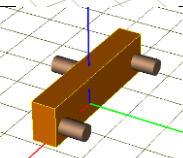
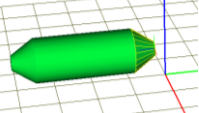
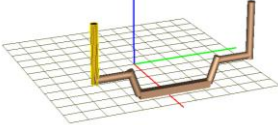
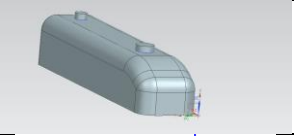
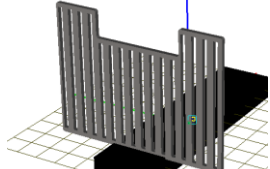
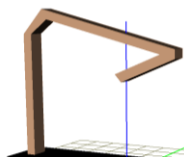
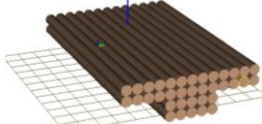
Рис. 2.26. Динамическая модель беспилотной погрузочно-транспортной машины колесной формулой 8×8

В модели колесной БПТМ с манипулятором и кониковой площадкой представленной на Рис. 2.26 используется перечень тел приведенный в Таблице 15.

Моделировался узел сочленения с помощью двух шарниров, обеспечивающих поворот полурам относительно друг друга в горизонтальной и вертикальной плоскости.

Таблица 15.

Элементы, используемые в модели колесной беспилотной ПТМ с манипулятором и кониковой площадкой.

№	Название	Кол-во, шт	Рис.	Масса, кг
1	Передняя полурама	1		4650
2	Задняя полурама	1		2700
3	Шарнирное сочленение	1		250
4	Колесо	8		450
5	Балансир	4		250
6	Мост	2		350
7	Конник	4		250
8	Моторный отсек	1		2300
9	Защитное ограждение	1		500
10	Манипулятор	1		1000
11	Пачка сортиментов	1		16500

По упрощенной геометрической модели вычисляются моменты инерции тел с равномерно распределенной по объему массой. Следующие тела модели колесной ПТМ жестко связаны друг с другом: передняя полурама с МТО, задняя полурама с кониками, защитным ограждением, манипулятором и трелюемыми сортиментами.

На Рис. 2.27 представлена геометрическая интерпретация разработанной математической модели колесной беспилотной ПТМ, оснащенная манипулятором с кониковой площадкой и сортиментами с указанием шарниров и центров масс.

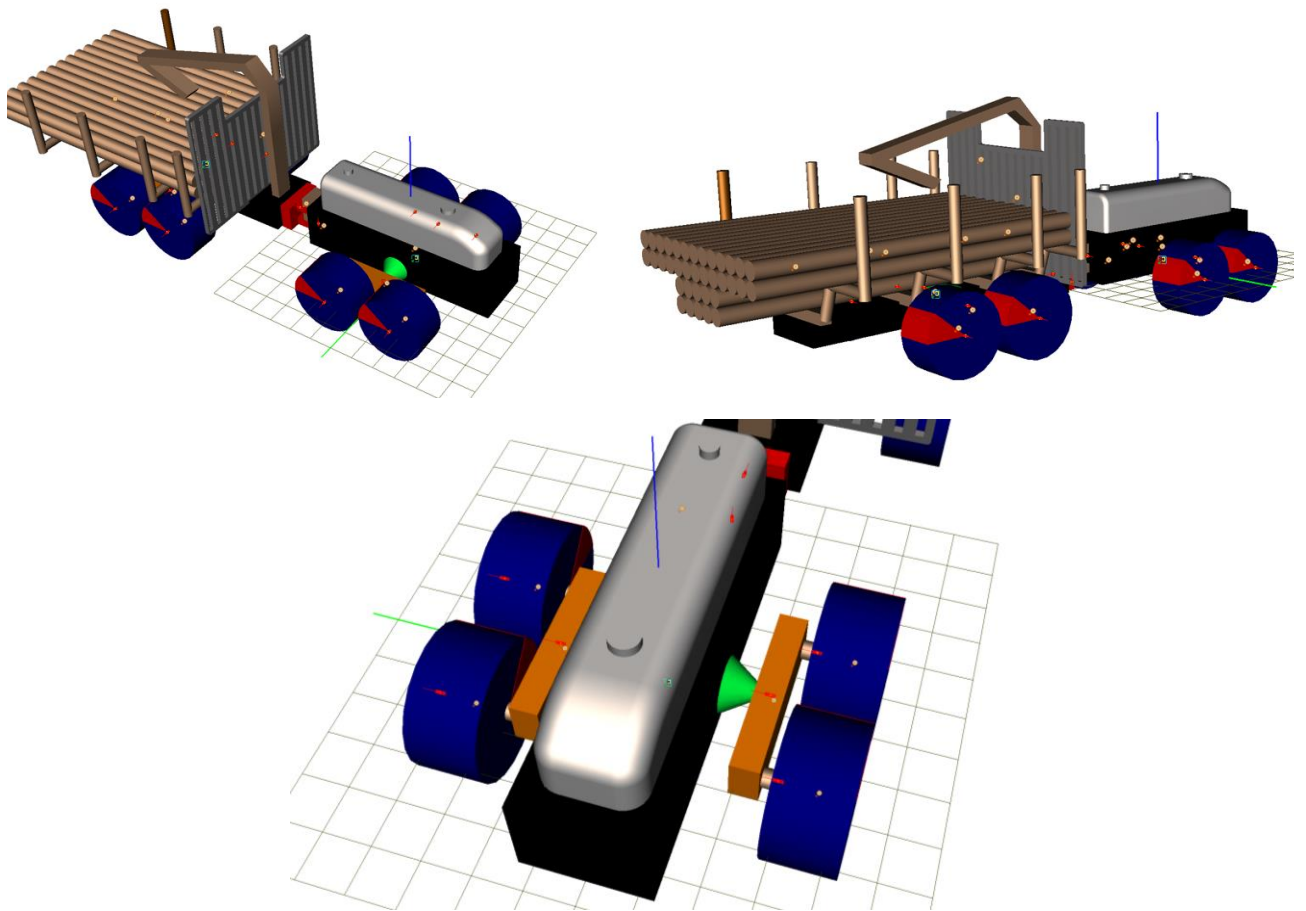


Рис.2.27. Динамическая модель колесной беспилотной ПТМ, оснащенная манипулятором с кониковой площадкой и сортиментами с указанием шарниров и центров масс

2.6. Модель взаимодействия пачки хлыстов с опорной поверхностью и технологическим оборудованием машины

2.6.1. Обзор и анализ исследований модели хлыста и пачки хлыстов

Транспортировка специфического груза, такого как пачки хлыстов, по лесным дорогам, вызывает ряд вопросов, связанных с их взаимодействием с лесотранспортной техникой.

Трелёвочные машины подвергаются динамическим нагрузкам со стороны перемещаемых хлыстов. Учёт этого взаимодействия важен для научного обоснования разработки новых высокопроизводительных машин в том числе беспилотных и модернизации существующих.

Увеличение мощности и скорости техники приводит к более интенсивным ударным нагрузкам, вибрациям и колебаниям. Эти колебания передаются на ходовую часть, подвеску, сиденье оператора гусеничной трелёвочной машины, что ведёт к износу деталей, повреждению навесного оборудования, быстрой усталости оператора и снижению эффективности эксплуатации [12, 88, 90].

Один из способов повысить скорость трелёвки без наращивания мощности – снижение уровня вибраций машины, загруженной пачкой хлыстов, а также исключение оператора за счёт внедрения беспилотных технологий.

При анализе сложной динамической системы «трелёвочная машина – пачка хлыстов – волок» целесообразно сначала изучить саму машину, а затем отдельно – пачки хлыстов.

Пачка хлыстов представляет собой сложную упругую динамическую систему с распределёнными параметрами [164, 178].

На сегодня разработаны различные модели хлыста и пачки. Некоторые исследователи отмечают, что учёт множества факторов (продольные силы, микронеровности дороги, наличие сучьев, кроны и т. д.) значительно усложняет расчёт статических и динамических характеристик [165, 177]. Поэтому часто применяют упрощённые модели, адаптированные под конкретные задачи.

К динамической модели пачки хлыстов в системе «трелёвочная машина – пачка хлыстов» предъявляются следующие требования [164]:

1. Учёт транспортных свойств древесины: геометрических, таксационных, физико-механических и др.
2. Соответствие механической модели методу расчёта нагрузок, передаваемых пачкой на машину, и волок.
3. Соответствие модели расчётной схеме транспортной системы.

При изучении колебаний машины с грузом необходимо определить транспортные, статические и динамические характеристики пачки.

Транспортные характеристики включают длину, площадь сечения, объём, удельный вес, модуль упругости, положение центра тяжести, осевой момент инерции и другие параметры, необходимые для расчётов.

Статические характеристики охватывают длину и вес приподнятой части хлыста, его упругость, статические нагрузки на оборудование и волок, сопротивление волочению.

Динамические характеристики включают частоты и формы колебаний пачки, динамические нагрузки на технику и волок, динамическое сопротивление перемещению.

Исследования моделей хлыста и пачки можно разделить на три группы:

1. Анализ транспортных характеристик пачки хлыстов.
2. Изучение статического взаимодействия пачки с машиной и волоком.
3. Исследование динамического взаимодействия пачки с техникой и волоком.

Во второй группе пачка рассматривается как система с распределёнными параметрами, а в третьей – как система с распределёнными или сосредоточенными параметрами.

Предложенная классификация основана на транспортных свойствах древесины, а также на статическом и динамическом взаимодействии пачки с машиной и волоком.

Транспортные свойства древесины изучались в работах Гастева Б.Г., Петруши Г.Н., Цофина З.С., Закревского Н.Б. и др.

Петруша Г.Н. [145] при расчёте нагрузки от пачки на трелёвочный трактор использовал следующие допущения:

1. Диаметры комля и вершины хлыста (D и d_0) не учитывают кору.
2. Влияние веса коры на изгиб хлыста учитывается через приведённый объёмный вес.

$$\gamma = \frac{Q_n}{V}, \quad (2.43)$$

где Q_n - Вес хлыста с корой;

V - объём хлыста без коры.

Величины D , d_0 , γ , модуль упругости E считаются заданными для данного хлыста, причём

$$D_0 = D (0,2 - 0,3), \text{ м} \quad (2.44)$$

Диаметр комлевой части хлыста устанавливается путём непосредственного измерения или расчётным методом на основе диаметра на высоте 1,3 м ($d_{1,3}$). Объём хлыста определяется с использованием таксационных таблиц.

3. Объёмный вес и модуль упругости считаются постоянными по всей длине ствола.

4. Момент инерции поперечного сечения изменяется по закону усечённого конуса вдоль ствола.

Как отмечал Петруша Г.Н., эти упрощения хотя и вносят небольшую погрешность, но существенно облегчают проведение расчётов, делая их практически применимыми.

2.6.2. Исследования транспортных свойств пачек хлыстов

Значительный вклад в изучение транспортных характеристик пачек хлыстов внёс Цофин З.С., который анализировал их перевозку автолесовозами и вагонами-сцепами. Развивая работы Гастева Б.Г. и Мельникова В.И. [50, 137], Цофин З.С. [165] вывел формулы для расчёта нагрузок в различных сечениях пачки:

$$S_n = \frac{q}{\gamma_n \cdot K_3}, \quad (2.45)$$

где $q = q_0 - kx^\mu$ - интенсивность распределённой нагрузки от собственного веса хлыстов в произвольном сечении с абсциссой x ;

q_0 - интенсивность нагрузки в комлевом сечении;

K - коэффициент сбега пачки.

Коэффициент μ определяется методом подбора из уравнения:

$$\frac{(\mu + 1) \cdot l_g^\mu - l_n^\mu}{(\mu + 1) \cdot (l_g^\mu - 1,3^\mu)} = \frac{P_n}{q_m l_n}, \quad (2.46)$$

где l_g - длина ствола наибольшей длины в пачке хлыстов;

l_n - длина пачки хлыстов (по наибольшему стволу);

P_n - вес пачки.

Этот коэффициент μ не зависит от объёма пачки. Коэффициент K_3 связан со средним теоретическим значением коэффициента полнодревесности $K_T \approx 0,85$ [2] соотношением:

$$K_3 = K_T \eta_3, \quad (2.47)$$

где η_3 - поправочный коэффициент.

При расположении хлыстов враскомлёвку площадь поперечного сечения пачки остаётся постоянной.

$$S_n = \frac{V_n}{l_n \cdot K_3} = const \quad (2.48)$$

Согласно исследованиям проф. Гастева В.Г. [50], момент инерции сечения пачки определяется по формуле:

$$J_n = \psi J_\mu, \quad (2.49)$$

где J_μ - момент инерции габаритного сечения пачки как составной балки с жёстким связями между хлыстами (монолитное сечение);

ψ - коэффициент жёсткости пачки, определяемый экспериментально (зависит от числа вертикальных рядов хлыстов).

Цофин З.С. предложил уточнённую зависимость [165]:

$$\psi = \psi_{хл} + \psi_{тр}, \quad (2.50)$$

где $\psi_{\text{хл}}$ - коэффициент жесткости древесной массы хлыстов;

$\psi_{\text{тр}}$ - коэффициент, характеризующий дополнительную жёсткость, обусловленная трением между хлыстами.

Трение в пачке увеличивает момент инерции, что характеризуется коэффициентом эффекта трения. Этот коэффициент не зависит от размеров хлыстов и их расположения, но уменьшается с ростом числа рядов в пачке. По данным Цофина З.С., трение повышает жёсткость пачки примерно на треть от жёсткости самой древесины.

Однако связывать момент инерции и силы трения напрямую нецелесообразно, так как эти факторы имеют разную природу. Следует отметить, что выводы Цофина З. С. не всегда применимы для анализа трелюемых пачек хлыстов.

После работ Гастева В.Г. и Цофина З.С. многие исследователи совершенствовали методы определения момента инерции и геометрических характеристик пачек, используя таксационные параметры деревьев.

Например, Макаров Ф.Н. [133] предложил корреляционную зависимость между объёмом и длиной сегментов хлыста от комля к вершине:

$$V_x = \frac{V_0}{l_0^2} \cdot (-0,2l_0x + 1,2x^2) \quad (2.51)$$

где V_0 - объём всего хлыста;

l_0 - его длина;

x - переменная длина отрезка хлыста.

Эта модель учитывает таксационные показатели, однако Макаров Ф.Н. не привёл сравнения её преимуществ с ранее существовавшими моделями.

Для пачки из одинаковых хлыстов автор рассчитал момент инерции в трёх ключевых сечениях (рис. 2.28):

1. В комлевой части.
2. В произвольном сечении.
3. В сечении, где хлысты уложены в один ряд на волоке.

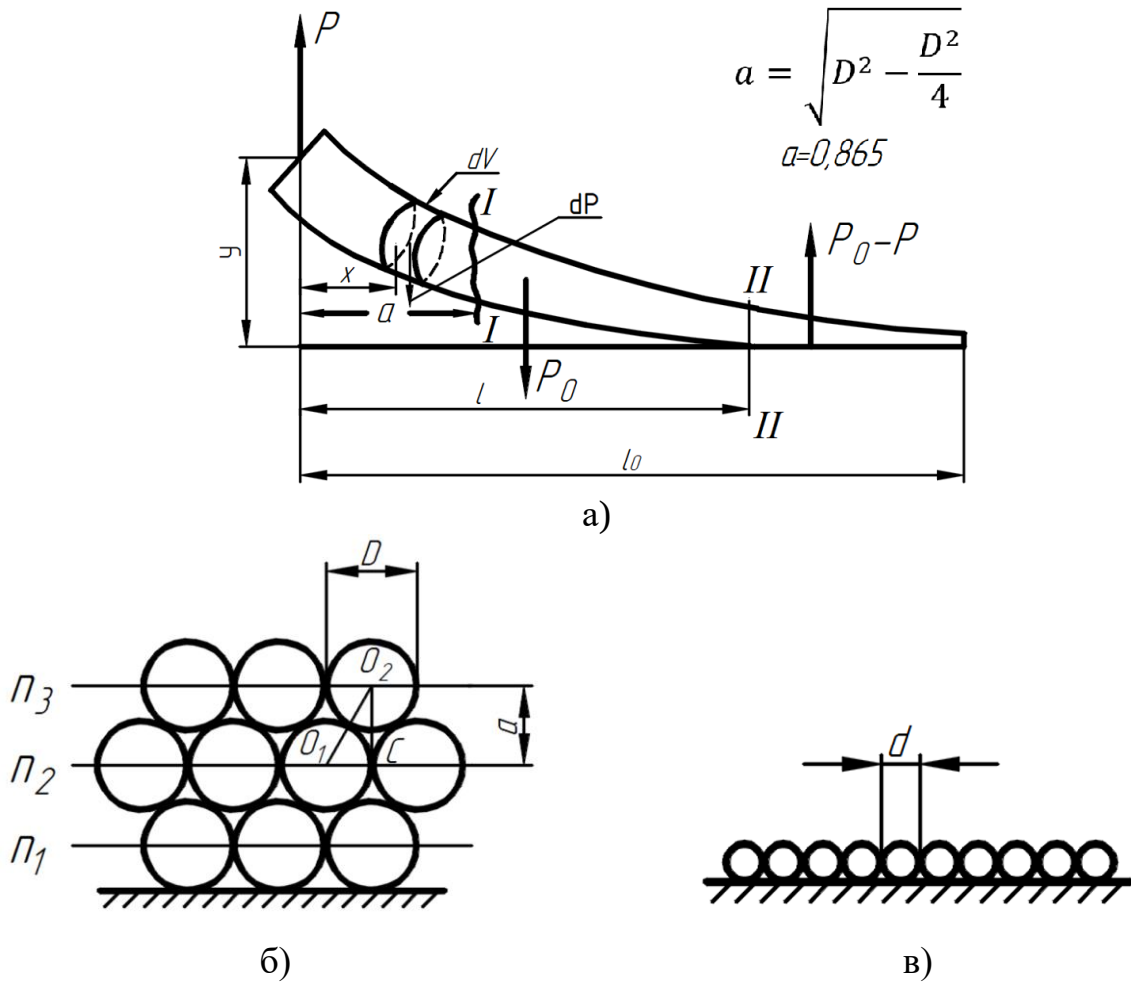


Рис. 2.28

Для комлевого сечения пачки момент инерции определяется по формуле:

$$J_{kn} = \frac{\pi D_y^4}{64}, \quad (2.52)$$

где D_y - условный диаметр комля.

При формировании пачки из трех рядов хлыстов применяется зависимость:

$$D_y^{III} = D \sqrt[4]{n + 12(n_1 + n_3)}, \quad (2.53)$$

где n - число хлыстов в пачке, состоящем в комлевом сечении из трёх рядов;

n_i - число хлыстов в i -ом ряду.

Для случая расположения хлыстов в один ряд на волоке момент инерции вычисляется как:

$$J_{вп} = nJ_{в} = n \frac{\pi d^4}{64}, \quad (2.54)$$

где d - диаметр вершины хлыста.

Момент инерции в произвольном сечении производится по формулам:

$$J_{xn} = \frac{\pi}{64} (D_y - \frac{D_y - d_y}{l} x)^4, \quad (2.55)$$

или

$$J_{xn} = J_{kn} (1 - K_2 x)^4, \quad (2.56)$$

где

$$K_2 = \frac{D_y - d_y}{D_y l}, \quad (2.57)$$

Следует отметить, что величина условного диаметра пачки в произвольном сечении требует дополнительного уточнения. Результаты исследований Макарова Ф.Н. могут быть полезны при создании усовершенствованных моделей трелюемых пачек.

Закревский П.Б. [83] на основе экспериментальных данных усовершенствовал зависимости между объемом, массой ствола и его геометрическими параметрами, разработав более точные формулы для определения центра тяжести и момента инерции. Автор установил, что момент инерции дерева:

1. Зависит от таксационных характеристик;
2. Не зависит от высоты и толщины ствола;
3. Принимая постоянный объемный вес по высоте ствола, приводит к занижению значения момента инерции.

Экспериментальным определением изгибной жесткости занимались Цофин З.С. [164], Александров В.А. [6], Кувшинов А.В. [124] и другие исследователи. Их работы показали необходимость использования усредненных значений модуля упругости древесины.

Кувшинов А.В. [124] предложил методику расчета геометрических параметров деревьев и хлыстов с учетом таксационных показателей:

Объем ствола определяется по формуле:

$$V_{ств} = q_{1,3} H (0,14 + 0,66 q_2^2 + \frac{0,32}{q_2 H}), \quad (2.58)$$

где $q_{1,3}$ - площадь поперечного сечения дерева;

H - высота дерева;

q_2 - коэффициент формы стволов по А. Шиффелю.

По данным проф. Захарова В.К. соотношение объемов: $V_{хл} = 0,78V_{дерева}$;
 $V_{ств} = 0,83V_{дер}$; $V_{хл} = 0,95V_{ствола}$

$$L_{хл} = H_{дер} - (3 \div 4) \text{ (м)},$$

Диаметр ствола на высоте груди

$$d_{1,3} = 2 \sqrt{\frac{1}{\pi} q_{1,3}}, \quad (2.59)$$

Диаметр на половине ствола

$$d_{1,2} = q_2 d_{1,3}, \quad (2.60)$$

Средний сбег комлевой части ствола

$$t_k = \frac{d_{1,3} - d_k}{0,5H_{дер} - 1,3}, \quad (2.61)$$

Диаметр комля ствола

$$d_k = d_{1,3} + 1,3t,$$

Диаметр хлыста в вершинной части:

$$d_{в/хл} = \frac{1}{2} \left[-d_k + \sqrt{d_k^2 - 4 \left(d_k - \frac{12V_{хл}}{\pi L_{хл}} \right)^2} \right], \quad (2.62)$$

Средний сберег по всей длине хлыста:

$$t = \frac{1}{L_{хл}} (d_k - d_{в/хл}), \quad (2.63)$$

Кувшинов А.В. ввел коэффициент $F_{сц} f$, характеризующий силы сцепления между хлыстами. Этот коэффициент аппроксимируется параболической зависимостью и включается в формулу момента инерции:

$$J_n = (a + bx + cx^2)n \frac{\pi(d_0 + tx)^4}{64}, \quad (2.64)$$

где n - число хлыстов в пачке.

Таким образом, исследования транспортных свойств древесины непрерывно развиваются и дополняются. Шире используются таксационные показатели древесины и экспериментальные данные. В качестве исходных параметров транспортные свойства древесины учитываются в исследованиях статических и динамических характеристик пачки хлыстов и хлыста.

Исследованиями в этой области занимались Ионов Б.Д., Петруша Г.Н., Гастев Б.Г. и другие ученые. В работах [161] хлыст моделировался как:

- жесткий цилиндрический стержень;
- усеченный конус с распределением нагрузки $1/3$ - $2/3$ от веса.

Эти допущения вполне приемлемы для малых по объёму (до $0,2\text{м}^3$) хлыстов небольшой длины.

Несоответствие между указанными нагрузками и экспериментальными данными побудило исследователей рассматривать хлыст как гибкую балку в виде усечённого конуса [143, 146].

Петруша Г.Н. [146] разработал аналитическое выражение для вертикальной нагрузки, учитывающее:

- длину приподнятой части хлыста;
- геометрические параметры;
- высоту точки крепления.

Однако длина приподнятой части хлыста им определялась экспериментально.

Законы распределения собственно нагрузки от кроны на подвешенном хлысте весьма разнообразны и зависят от многих факторов.

При моделировании кроны принимались следующие допущения:

1. Замена хлыста с кроной эквивалентным усеченным конусом;
2. Увеличение вершинного диаметра пропорционально нагрузке от кроны;
3. Изгиб воспринимается только стволовой частью.

Эксперименты показали, что наличие кроны увеличивает нагрузку всего на 4-7% по сравнению с хлыстами без кроны.

Попытка автора учесть горизонтальную тяговую силу при равномерной трелевке хлыста не привела к удовлетворительному решению, т.к. длину и вес приподнятой части хлыста расчётным путём определить не удалось.

Фундаментальные работы Гастева Б.В. [50], Мельникова В.И. [137], Цофина З.С. [165] заложили глубокие основы в исследовании пачки хлыстов.

Установлено, что пакет хлыстов в статике может рассматриваться как балка постоянной жёсткости с равномерно распределённой нагрузкой, либо переменной жёсткости с неравномерно распределённой нагрузкой. Первому случаю соответствует пакет, в котором хлысты уложены комлями в разные стороны, второму - пакет, в котором хлысты уложены в одну сторону. В последнем случае закон изменения интенсивности нагрузки от собственного веса пачки хлыстов (грузовой линии) описывается уравнением кривой, плотность которой определяется по закону

$$\rho = \rho_0 - kx^\mu, \quad (2.65)$$

где ρ_0 , k , μ - постоянные коэффициенты.

Цофин З.С. исследовал деформации пачек при транспортировке, используя графоаналитический метод. Однако условия крепления в этих исследованиях отличались от реальных условий трелевки. Расчётная схема пачки приведена на Рис. 2.29.

Исследования показали, что ключевые характеристики пачки хлыстов могут быть выведены на основе их таксационных показателей. В работе Макарова Ф.Н. [133] предложен метод расчета нагрузок на тракторный щит, где хлыст моделируется как гибкая балка с учетом таксационных параметров (Рис. 2.28а). В дифференциальное уравнение прогиба была включена корреляционная зависимость между объемом древесины и длиной отдельных сегментов ствола.

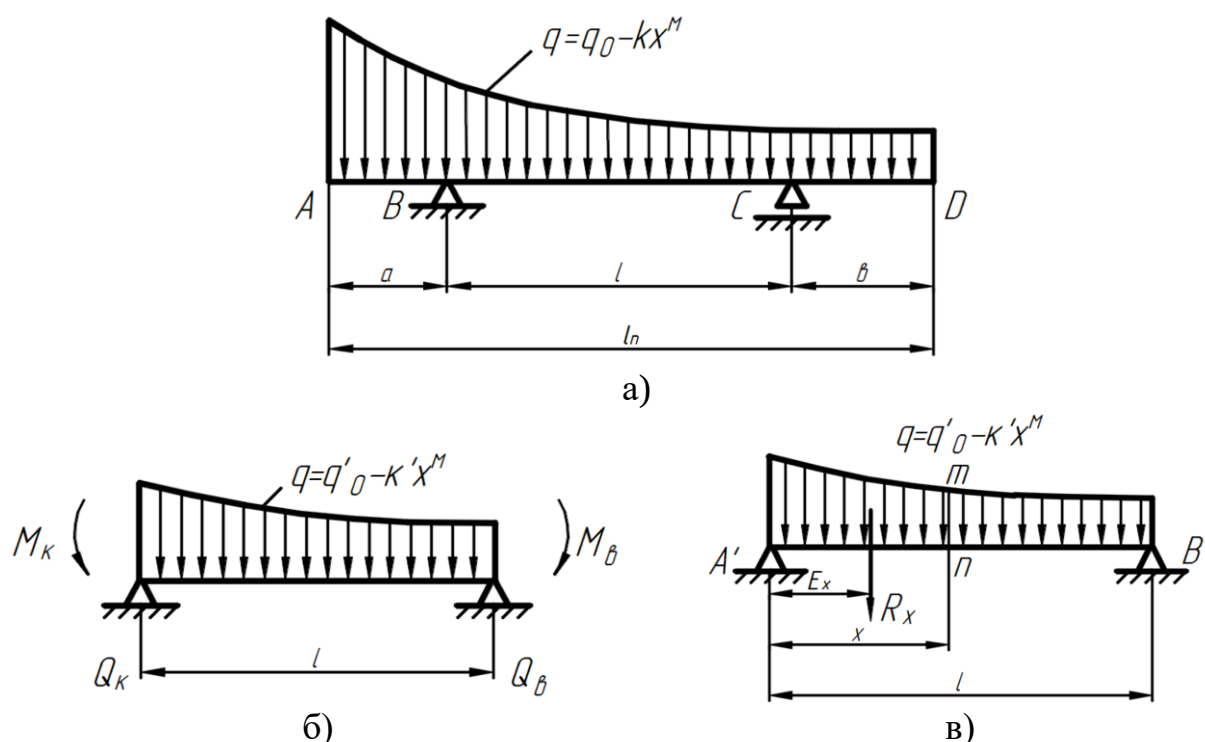


Рис. 2.29 Расчётная схема пачки (Цофин З.С.)

Основные выводы исследования:

1. Вертикальная нагрузка на заднюю ось трактора увеличивается пропорционально:

- массе перемещаемых хлыстов;
- уменьшению их длины;
- росту высоты подъема передней части.

2. Нагрузки сохраняют зависимость как в статическом положении, так и при равномерном движении.

Макаров Ф.Н. рассматривает пачку как набор идентичных хлыстов:

- в зоне тракторного щита - уложенных в несколько рядов;
- на волоке - расположенных в один ряд (Рис. 2.28).

Момент инерции в произвольном сечении рассчитывается через условные параметры и коэффициент сбега. Подстановка в уравнение упругой линии дает результаты, аналогичные случаю одиночного хлыста. Однако невозможность аналитического определения длины приподнятой части сделала результаты зависимыми от экспериментальных данных.

Михайлов Л.М. в своих исследованиях предложил рассматривать перемещаемый комлевой частью вперед хлыст в качестве гибкого конического элемента. Применяя графоаналитическую методику, исследователь вывел приблизительные значения изгибающих моментов. Однако использованные им пограничные условия для дифференциального уравнения, описывающего упругую деформацию хлыста, содержали методологические неточности. Это привело к получению недостаточно точных формул для вычисления длины приподнятого над волоком участка хлыста. Как следствие, расчетные значения вертикальной нагрузки на трактор и волок оказались приблизительными.

В отличие от этого подхода, исследования Лямина И.В. и Кувшинова А.В. [124] основывались на моделировании хлыста как упругого элемента в форме усеченного конуса. В сравнении с методикой Петруши Г.Н. [146], ученым удалось установить аналитическую взаимосвязь между:

- способом подъема хлыста (за комель или вершину);
- величиной нагрузки на трактор при условии постоянной длины поднятого участка и переменной высоты подъема концевой части.

Особого внимания заслуживают результаты Кувшинова А.В. [124], где были определены:

1. Вертикальные и горизонтальные силовые воздействия.
2. Характер взаимодействия хлыста с зажимным кониковым механизмом.

Для вычисления длины поднятого участка было получено сложное трансцендентное уравнение. Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными выявило определенные расхождения. Это побудило авторов сделать вывод о необходимости введения эмпирических поправочных коэффициентов при использовании условия нулевого значения изгибающих моментов в точке контакта хлыста с ОП (грунтом) обозначенной как точка *B* на Рис. 2.30.

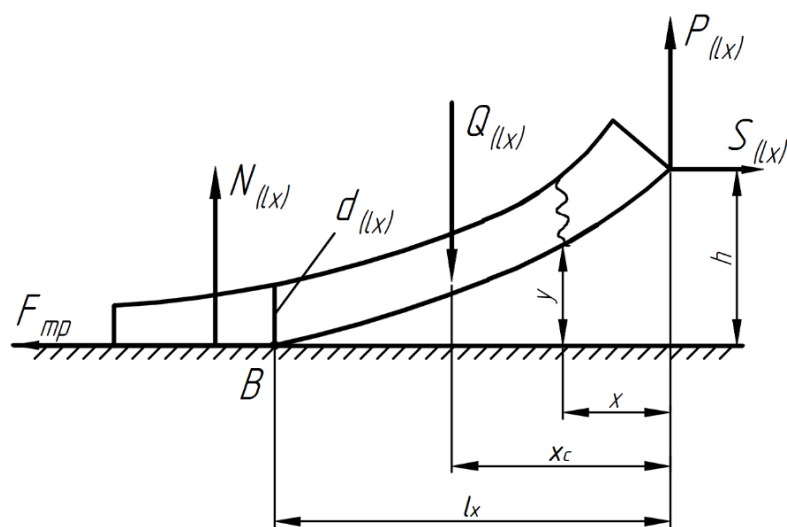


Рис. 2.30. Расчётная схема пачки (Кувшинов А.В.)

Рассматриваемое допущение приводит к снижению точности теоретических вычислений, делая их зависимыми от результатов экспериментальных исследований. В своей работе Эмайкин Л.М. [177] предложил усовершенствованный метод определения вертикальных статических нагрузок на трелевочные механизмы, учитывающий влияние упругих свойств грунта на контактирующую с ним часть хлыста.

Автор полагает, что подъему участка АВ (Рис. 2.31) хлыста над грунтом противодействует заземляющий момент $M = P \cdot a$ и рассматривает пролёт АВ как консоль с одним заделанным в точке В и одним свободно опёртым в точке А концом, то есть прогиб и кривизна в точках А и В равны нулю (Рис. 2.31 а).

Такой подход преобразует систему АВ в статически неопределимую, решение которой при заданной высоте подъема на конике осуществляется методом сравнения деформаций (Рис. 2.32 б, в). Для анализа используется графоаналитическая методика, включающая:

- замену реальной балки (Рис. 2.31 б, в) фиктивной системой (Рис. 2.33 а, б);
- приложение фиктивной нагрузки;
- получение аналитического выражения для определения длины поднятого участка хлыста.

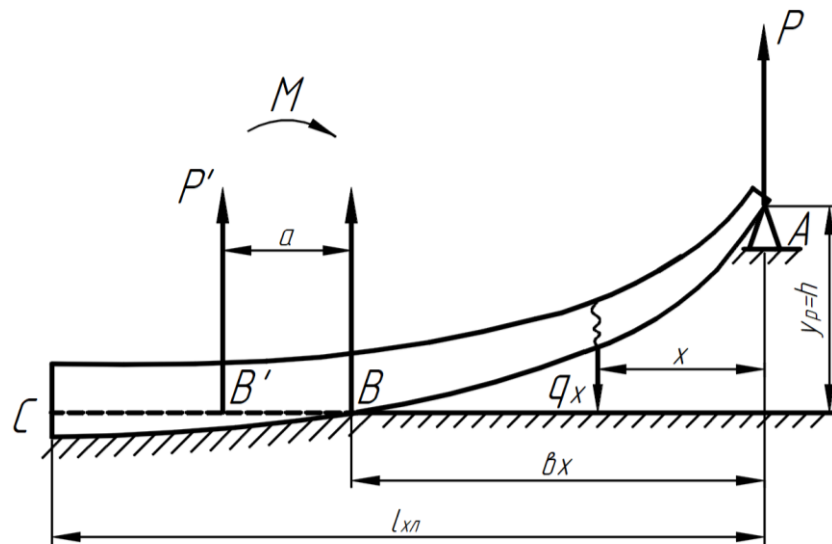


Рис. 2.31.

Данная методика позволяет более точно учитывать реальные условия взаимодействия хлыста с грунтом и трелевочным оборудованием, хотя и требует дополнительных вычислительных процедур.

$$q(x) = \frac{M(x)}{EJ(x)}, \quad (2.66)$$

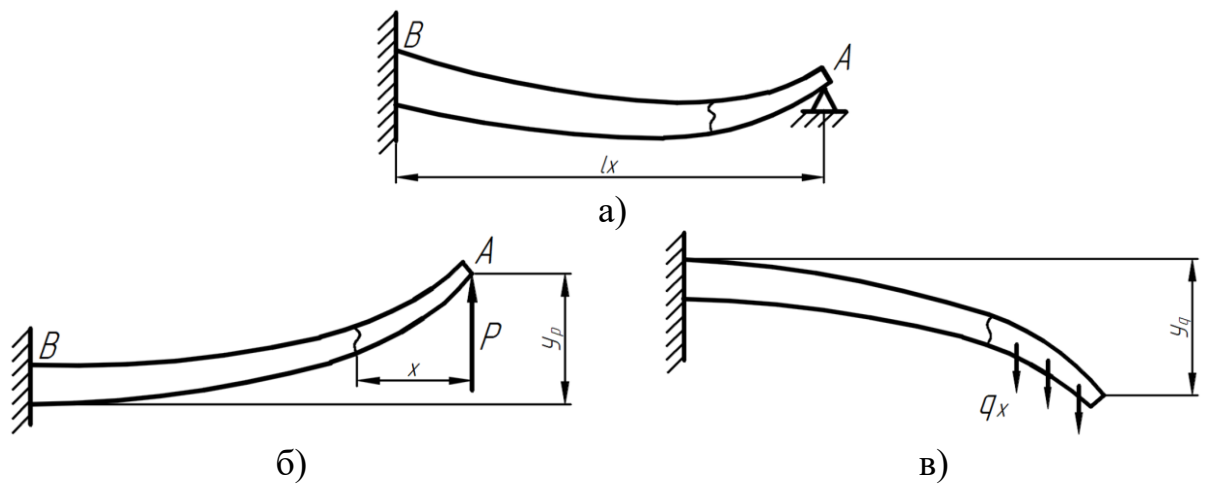


Рис. 2.32

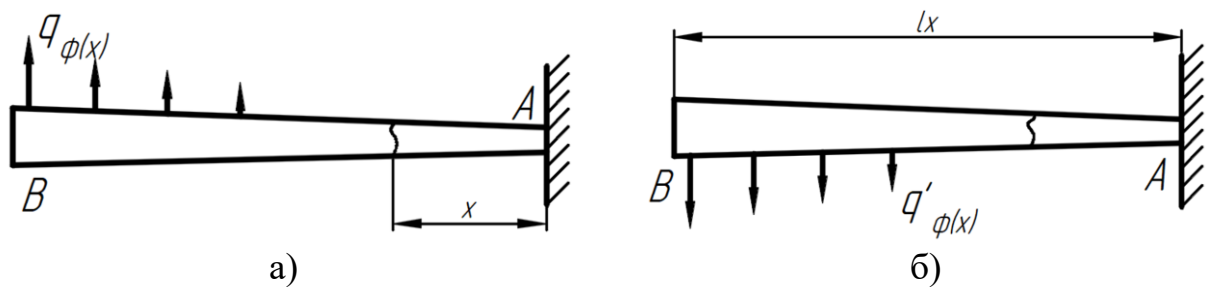


Рис. 2.33

В своих последующих исследованиях Эмайкин Л.М. предложил методику определения вертикальной статической нагрузки для частично поднятых за комель деревьев, учитывающую влияние кроны, но игнорирующую упругие свойства грунтового основания. В данной модели предполагается, что ветви дерева выполняют поддерживающую функцию, предотвращая деформацию ствола и его погружение в почвенный слой. При этом поднятый участок ствола моделируется как балка со свободными опорами, без учета взаимодействия с лежащей на земле частью.

Критические замечания к работам Эмайкина Л.М.:

- отсутствие учета горизонтальных тяговых усилий;
- игнорирование сил сопротивления движению;
- определение параметров поднятой части ствола без рассмотрения указанных факторов.

Билык Б.В. совместно с Перетятко Б.Г. разработали расчетные зависимости для определения длины приподнятого участка хлыста при различных способах трелевки (комлевой или вершинной частью вперед), включающие учет растягивающих напряжений. Однако методический аппарат вывода этих формул в публикациях не раскрыт. Согласно полученным результатам:

- ключевым параметром выступает только диаметр на высоте 1,3 м;
- геометрическая конусность ствола в расчетных выражениях не отражена, несмотря на принятую модель усеченного конуса.

Вопросу сопротивления движению хлыстов при их транспортировке в полупогруженном (полуподвешенном) положении посвящена работа Смехова С.Н. [154]. Автор обобщил основные исследования по этому вопросу и пришел к следующим выводам:

1. Существенные расхождения в экспериментальных данных различных авторов.
2. Недостаточная проработка физических основ взаимодействия стволов с опорной поверхностью.

3. Разночтения обусловлены методическими различиями и неодинаковыми условиями проведения опытов.

4. Практическое применение требует использования усредненных коэффициентов.

Разноречивость экспериментальных данных может быть объяснена различиями в методике исследований и разными условиями экспериментов. Для практического применения можно рекомендовать лишь усреднённые значения коэффициента сопротивления (см. работу [2]).

Для повышения точности расчётов требуется:

1. Глубокий анализ физической природы взаимодействия между хлыстами и опорными поверхностями (грунт, снег). Это позволит выявить ключевые закономерности, влияющие на сопротивление движению.

2. Проведение исследований по стандартизированной методике, что обеспечит сопоставимость данных и исключит методические погрешности.

Основные факторы, требующие изучения:

- состояние опорной поверхности (плотность, влажность, наличие неровностей);
- температура воздуха (влияет на свойства снега и грунта);
- рейсовая нагрузка (интенсивность воздействия на поверхность);
- высота подъёма комлевой части пачки (изменяет распределение нагрузки);
- скорость перемещения пачки (динамические эффекты при ускорении и торможении);
- характер транспортировки (непрерывное движение, цикличность, наличие остановок).

Только комплексный учёт этих параметров позволит получить достоверные коэффициенты сопротивления, применимые в реальных условиях лесозаготовки.

При анализе статических параметров пачка хлыстов обычно рассматривается как система с распределенными параметрами, тогда как для

исследования динамических свойств применяется комбинированный подход, учитывающий как распределенные, так и сосредоточенные параметры.

Значительный вклад в изучение динамического взаимодействия пачек хлыстов с лесотранспортной и лесозаготовительной техникой внесли такие исследователи, как: Гастев Б.Г., Цофин Э.С., Жуков А.В., Леонович И.И., Костогрыз С.Г., Варава В.И., Смехов С.Н., Билык Б.В., Перетятко Б.Т., Эмайкин И.В., Филькевич И.В. и другие.

В работе [50] Гастевым Б.Г. была предложена и обоснована динамическая модель пакета хлыстов, взаимодействующего с лесовозным автопоездом.

Пакет хлыстов был заменён тремя дискретными массами, приведенными к центру тяжести пакета и точкам подвеса автомобиля и прицепа (Рис. 2.33 а). При этом были выполнены следующие условия:

1. Сумма трёх дискретных масс равна действительной массе пакета хлыстов.
2. Центр тяжести трёхмассовой модели пакета хлыстов и действительного пакета совпадают.
3. Момент инерции трёхмассовой модели пакета и действительного пакета хлыстов совпадают.

Эта модель сравнительно проста, универсальна в смысле применения в расчётных схемах различных типов лесотранспортных машин и позволяет учесть упругие свойства пакета хлыстов.

Ряд учёных применяли упрощённые динамические модели для изучения пачки хлыстов. Например, С.Г. Костогрыз при моделировании гусеничного трактора использовал двухмассовую схему, где одна масса (колеблющаяся) располагалась на щеке трактора, а вторая (неподвижная) волочилась по ОП [73].

З.С. Цофин в своих исследованиях [164, 165] существенно развил работу В.Г. Гастева. В частности, он изучил собственные частоты колебаний пакетов хлыстов как с постоянным, так и с переменным поперечным сечением.

Для определения частоты собственных колебаний пачки хлыстов постоянного сечения используется дифференциальное уравнение, выведенное из классического уравнения изгибных колебаний прямого бруса.

$$EJ_n \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{q}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (2.67)$$

где q - интенсивность нагрузки от собственного веса пачки хлыстов;

$\frac{q}{g}$ - погонная масса пачки.

Круговая частота собственных изгибных колебаний

$$V = \frac{\lambda^2}{l^2} \sqrt{\frac{1}{m} EJ_n}, \quad (2.68)$$

где l - пролёт балки;

λ - коэффициент, определяемый в зависимости от типа опор.

Для пачки хлыстов переменного сечения дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EJ_n \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] + \frac{q_0 - kx^\mu}{q} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (2.69)$$

где $q_0 - kx^\mu$ - интенсивность нагрузки от собственного веса;

q_0, k, μ - параметры, зависящие от объёма пачки, таксационных показателей хлыстов и технологии лесосечных работ.

Уравнение решается приближённо вариационным методом, основанным на минимизации функции Лагранжа $L = V - T$.

Сравнение теоретических данных с экспериментальными позволило автору сделать следующие выводы:

1. Собственная частота колебаний хлыстов определяется их таксационными характеристиками.

2. В пакете хлыстов колебания протекают как в системе с сопротивлением, линейно зависящим от скорости. Трение между хлыстами значительно влияет на коэффициент затухания. Затухание колебаний в пачке в 2–7 раз выше, чем у одиночного хлыста.

3. Жёсткость и масса в пачках хлыстов изменяются практически пропорционально.

4. Силы трения между хлыстами повышают жёсткость пачки примерно на 30% по сравнению с жёсткостью самой древесины.

Эти результаты были получены для пакетов, транспортируемых на вагонах сцепках «ЛТА-ЛЕНЛЕС» и автолесовозах, поэтому их нельзя напрямую применять к трелёвочным системам.

Также были определены частоты изгибных колебаний для конических стержней.

$$\omega = \frac{D_0 E^{\frac{1}{2\varepsilon}}}{4l_y^2 \rho^{\frac{1}{2}}}, \quad (2.70)$$

где ω - круговая частота;

ρ - плотность материала;

E - модуль упругости;

D_0 - диаметр большого торца усечённого конуса;

ε - коэффициент, зависящий от показателя конусности «К».

В исследовании [178] Л.М. Эмайкин анализирует частоты свободных колебаний деревьев при изучении динамических нагрузок на трелевочный трактор. В своей работе автор применяет методику, сходную с подходом А.Р. Ржаницына для вычисления критических сил при различных формах потери устойчивости конического стержня с шарнирным закреплением.

Эмайкин Л.М. находит простые выражения для частот свободных колебаний шарнирно-опёртого дерева:

$$\omega = \frac{\pi E^{\frac{1}{2}} D_0}{4l_\phi^2 \rho^{\frac{1}{2}} K^{\frac{1}{2}}}$$

Для $K = 1 - 4$ и $n = 1$,

$$\omega = 1,15 \frac{\pi^2 E^{\frac{1}{2}} D_0}{l_\phi^2 \rho^{\frac{1}{2}} K^{\frac{1}{2}}}$$

Для $K = 3 - 4$ и $n = 2$,

где l_ϕ - длина усечённого конуса;

K - параметр конусности (отношение полной длины конуса к длине отрезанной вершины);

n - номер формы колебаний.

В работе [176] Эмайкин Л.М. изучает вынужденные колебания хлыстов, вызванные неравномерным движением трелевочного трактора.

С.Н. Смехов в работе [154] исследует колебания и сопротивление движению хлыстов, транспортируемых в полупогруженном состоянии. В данном случае на хлысты действуют растягивающие силы: натяжение троса лебедки и сила F , обусловленная сопротивлением движения волочащейся части.

В модели хлысты представлены как балка, нагруженная только собственным весом. Дифференциальное уравнение свободных поперечных колебаний стержня записывается в виде:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{A\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (2.71)$$

где $A = A(x)$ - площадь поперечного сечения;

$-\frac{A\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ - сила инерции, нагружающая колеблющийся стержень.

С.Н. Смехов определяет частоты собственных колебаний хлыстов, используя энергетический подход. В его методике хлысты моделируются в виде ступенчатой балки, составленной из одинаковых по длине цилиндрических участков.

Основные выводы исследований:

1. При движении хлыстов по неровным трелевочным волокам возникают дополнительные вертикальные нагрузки на поверхность скольжения, обусловленные колебательными процессами.

2. Величина этих нагрузок находится в зависимости от скорости перемещения и влияет на изменение показателей удельного сопротивления движению.

В динамических расчетах лесотранспортных машин широко применяется трехмассовая модель, первоначально разработанная профессором Гастевым Б.Г. (Рис. 2.34 а)

Данная модель позволяет:

- упростить анализ динамических нагрузок;
- оптимизировать конструктивные параметры техники.

Модель получила развитие в работах различных исследователей, включая:

- монографию А.В. Жукова и И.И. Леоновича;
- публикации В.И. Варавы;
- диссертационное исследование Филькевич И.В. [160].

Модификация модели Филькевич И.В. [160]:

1. Хлыст представлен тремя точечными массами:

m_2 - колеблющаяся составляющая;

m_{21} - часть, находящаяся на транспортном средстве;

m_{22} - волочащийся участок (Рис. 2.34 б, в).

2. Конструктивные особенности модели:

- массы соединены жесткими шарнирными стержнями;
- изгибная жесткость системы моделируется упругим элементом (коэффициент жесткости C_φ);
- упругий момент: $M_{\text{упр}} = C_\varphi \varphi$;
- демпфирующие свойства учитываются через момент сил трения: $M_{\text{тр}} = -\alpha \varphi$ (где φ - угол между стержнями).

3. Расположение масс:

-колеблющаяся масса (m_2) размещена в центре тяжести приподнятой части хлыста (точка В, Рис. 2.34 в);

- волочащаяся масса (m_{23}) расположена в сечении, где действует реакция грунта.

Из условий динамического замещения масс с учётом сделанных допущений определяются величины сосредоточенных масс.

$$m_2 = m_n \frac{lh_c - A - \Delta(l - h_c)}{t_1 t_2}, \quad (2.72)$$

$$\Delta = \frac{h_c - l_\beta}{1 - \beta}, \quad (2.73)$$

$$m_{21} = m_n \beta - m_2 \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \quad (2.74)$$

$$m_{23} = m_n(l - \beta) - m_2 \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \quad (2.75)$$

где m_n , l , h_c - масса, длина и расстояние до центра тяжести пачки;

β - статический коэффициент погруженности, $A = (40 - 150)$ - для длины деревьев от 15 до 30 м.

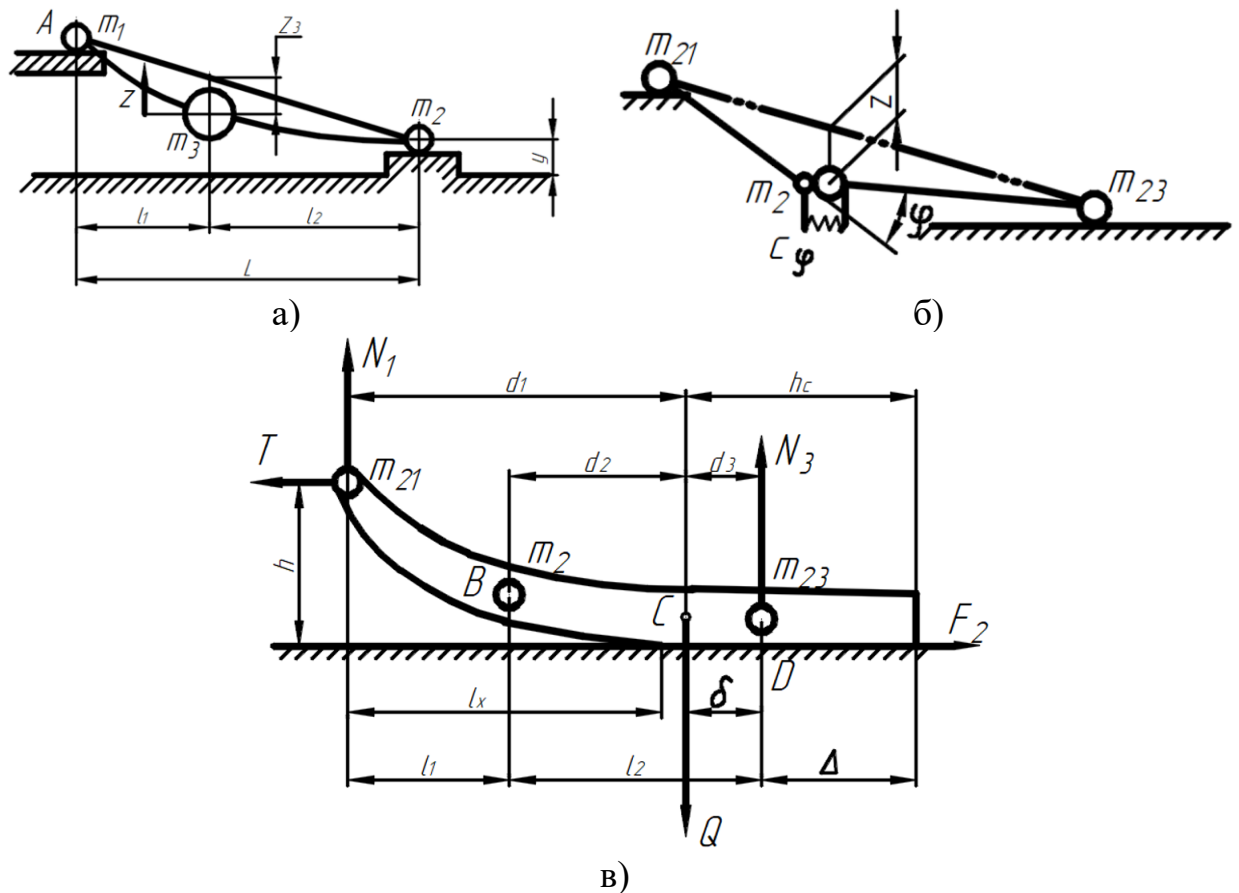


Рис. 2.34.

Смещение реакции грунта на лежащую часть хлыста по отношению к его свободному концу отражает упругость самого хлыста и трение в его контакте с грунтом. Физические явления в зоне взаимодействия волочащейся части хлыста с поверхностью лесного волока, влияющие на величину и направление реакции грунта, изучены, по мнению автора [176], не в полной мере. В связи с этим данная величина определяется через статический коэффициент погружения.

Модель Филькевича И.В. имеет отличие от модели профессора Гастева Б.Г., поскольку включает упругие и демпфирующие свойства пачки, а также учитывает взаимосвязь между приподнятой и лежащей на грунте частями пачки, хотя последняя условно не участвует в колебаниях.

Филькевич И.В. приходит к следующим выводам:

1. Колебательные характеристики хлыста определяются массой колеблющейся части, коэффициентом жесткости C_φ и коэффициентом внутреннего трения α .
2. Дальнейшее изучение транспортных свойств перемещаемой древесины должно быть сосредоточено на определении её приведённой жесткости C_n , коэффициента внутреннего трения и параметров упругого контакта волочащейся части с грунтом Δ .

Б.В. Билык и Б.Г. Перетятко, учитывая отсутствие подходящего метода математического моделирования пачек хлыстов, предлагают упростить расчёт упругой системы с распределённой массой, заменив её несколькими точечными массами (более трёх) (Рис. 2.35). В качестве критерия эквивалентности используется частота основной моды колебаний. Исследователи сформулировали следующие условия:

1. Общая масса модели должна соответствовать массе реальной системы;
2. Положение центра масс модели должно совпадать с центром масс реальной системы;
3. Момент инерции модели относительно центра масс должен быть равен моменту инерции реальной системы;
4. Собственные частоты модели и реальной системы в диапазоне вынужденных колебаний должны быть идентичны;
5. Формы колебаний модели и реальной системы на этих частотах должны совпадать.

Если точечные массы расположить в узлах $(\theta + 1)$ -й формы колебаний реальной системы (где θ – число учитываемых форм колебаний модели), то последние четыре условия выполняются полностью (Рис. 2.35 в).

Экспериментальные и аналитические исследования (с применением метода О.Н. Майклстеда [224]) позволили определить основные формы колебаний частично погружённых хлыстов.

При моделировании полупогруженный хлыст представлялся как двухопорная балка переменного сечения, где расстояние между опорами соответствовало длине приподнятой части хлыста (Рис. 2.35 а, б).

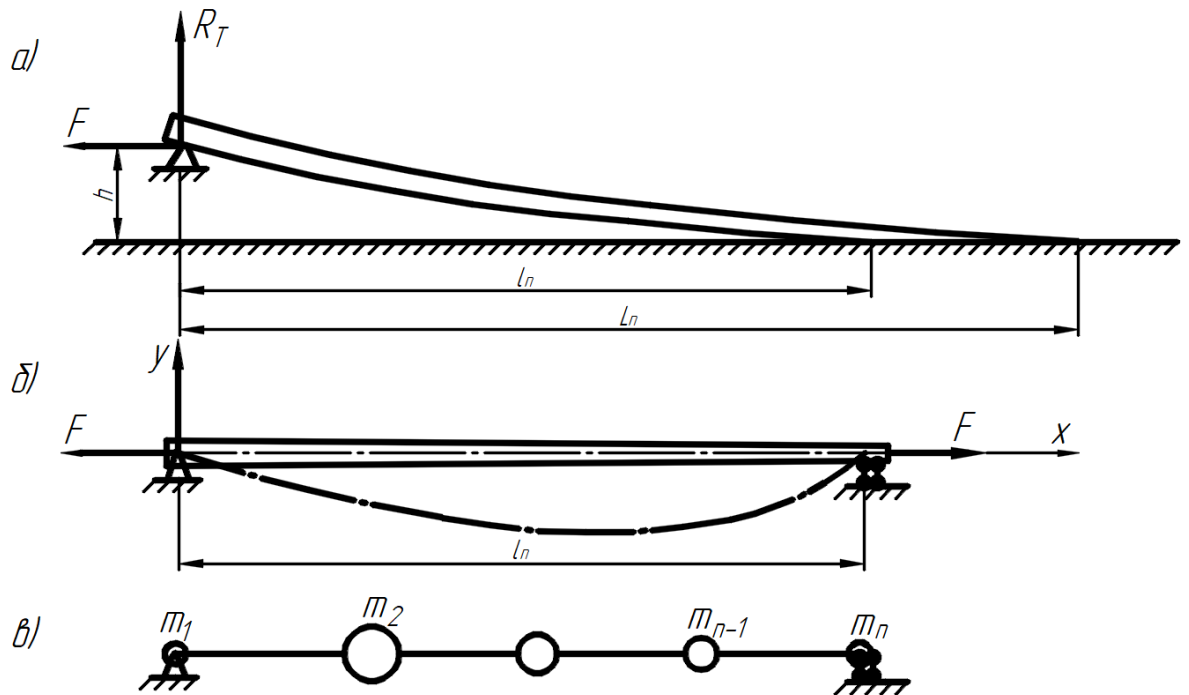


Рис. 2.35.

В результате исследований были сделаны важные выводы:

1. При приложении к полупогруженному хлысту продольной силы F (Рис. 2.35 а), вызванной сопротивлением перемещению значения собственных частот и формы колебаний изменяются несущественно. Последнее объясняется тем, что продольная сила наряду с увеличением жёсткости хлыста, вызывает увеличение расстояния между его опорами. Поэтому при разработке модели хлыста трелюемого в полупогруженном состоянии, продольные силы можно не учитывать.

2. Значение собственных частот трелюемого хлыста в основном определяются его физико-механическими характеристиками (E , γ) и высотой погрузочного устройства трактора.

$$\omega_i = c_i \frac{d_{1,3}}{i^2} \sqrt{\frac{1}{\gamma} E g}, \quad (2.76)$$

где c_i - постоянные величины,

i - номер формы собственных колебаний ($i = 1, 2, 3$).

Диаметр хлыста $d_{1,3}$ не оказывает существенного влияния на значения собственных частот, поэтому при разработке модели можно воспользоваться параметрами хлыста с наиболее вероятностными таксационными характеристиками.

4. Трелюемые в полупогруженном состоянии хлысты контактируют между собой в большинстве случаев только комлями (при трелёвке за комли) или только вершинами (при трелёвке за вершины), поэтому при исследовании вертикальных колебаний трелёвочных тракторов, пачку хлыстов можно представить в виде балки момент инерции поперечного сечения которой равен сумме моментов инерции поперечных сечений хлыстов.

Наряду с подходом к динамической модели пачки хлыстов как системы с сосредоточенными параметрами (массами) развивается направление, в котором хлысты рассматриваются как система с распределёнными параметрами [88].

В отчете [88] Капроновым И.В. разработана упрощённая модель трелюемой пачки хлыстов в виде двухопорной балки постоянного поперечного сечения. Пачка хлыстов состоит из хлыстов одинаковой цилиндрической формы и объёма. Из дифференциального уравнения упругой линии хлыста найдена длина его приподнятой части $L_{хл}$ без учёта и с учётом растягивающих сил. Вычисленный параметр $L_{хл}$ позволил рассчитать вес приподнятой части пачки хлыстов, вертикальную нагрузку на щит трелевочного трактора от пачки, горизонтальное тяговое усилие трелёвки.

Автором были получены частоты собственных поперечных колебаний без учета и с учетом горизонтальной тяговой силы S

$$p_n = \frac{\pi^2 n^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_x}{m_l}} \cdot \sqrt{1 + \frac{S}{EJ_x} \cdot \frac{l^2}{\pi^2 n^2}}, \quad (2.77)$$

где $m_l = \gamma_l / l$, $l \approx L_{хл}$;

n - число форм колебаний.

В работе [88] было установлено, что частоты собственных поперечных колебаний пачки хлыстов полностью определяются конструктивным параметром - высотой над поверхностью дороги точки крепления приподнятой части пачки к корпусу трактора.

Продольная сила, нагружающие колеблющуюся балку, изменяет её частоту собственных колебаний незначительно.

Капанова И.В. установлено возмущающее воздействие на пачку хлыстов со стороны трелёвочного трактора ТТ-4 и рассмотрены вынужденные колебания трелюемой пачки хлыстов. Им получены аналитические выражения статических и кинематических реакций связей пачки хлыстов - реакции точки крепления трелюемой пачки хлыстов, обусловленные вынужденными поперечными колебаниями пачки хлыстов.

На основании краткого обзора и анализа исследований модели пачки хлыстов можно сделать следующие выводы:

1. Отсутствие достаточно разработанных и внедрённых в практику методов расчёта геометрических, статических и динамических характеристик пачки хлыстов, параметров силового взаимодействия пачки с транспортным средством и волком приводит к тому, что указанные характеристики (длина, вес приподнятой части хлыстов и пачки над поверхностью волока, статические и динамические нагрузки на трелёвочный трактор, статическое и динамическое сопротивление волочению пачки и т.д.) в настоящем определяются дорогостоящим экспериментальным способом.

2. Различные подходы к созданию динамической модели трелюемой пачки хлыстов применительно к конкретным задачам с соответствующими допущениями затрудняют использование полученных расчётных характеристик пачки для дальнейших исследований его взаимодействия с трелёвочными машинами.

3. Недостаточно полное и глубокое исследование взаимодействия пачки хлыстов с гусеничными трелёвочными тракторами и отсутствие рациональной методики расчёта этого взаимодействия приводит к разработке новых

трелёвочных тракторов без научно-обоснованного выбора конструктивных параметров ходовой части системы подрессоривания этих машин.

4. Сохраняется практическая потребность в дальнейших уточнениях и разработках моделей пачки хлыстов, а также в совершенствовании методов расчета их статических и динамических характеристик.

2.6.3. Математическая модель взаимодействия пачки хлыстов с опорной поверхностью и пачковым захватом

В прикладных пакетах динамики, используемых для моделирования лесозаготовительных процессов, часто моделируются хлысты, а не целые деревья, по нескольким причинам:

1) Упрощение модели:

- Хлыст – это ствол дерева без ветвей и кроны, что значительно упрощает геометрию модели. Ветви и крона добавляют сложность из-за их нерегулярной формы и изменчивости.

- Моделирование хлыстов требует меньше вычислительных ресурсов, что особенно важно для крупномасштабных симуляций или работы в реальном времени.

2) Практическая применимость:

- В реальных условиях лесозаготовок деревья часто разделяются на хлысты непосредственно на лесосеке (например, при валке или обрезке ветвей). Таким образом, моделирование хлыстов соответствует реальным технологическим процессам.

- Хлысты являются основным объектом транспортировки при трелевке, поэтому их динамика наиболее важна для анализа.

3) Учет основных сил и сопротивлений:

- При моделировании хлыстов основное внимание уделяется силам сопротивления волочению, трению о грунт, взаимодействию с трелёвочным оборудованием и другими хлыстами. Эти факторы являются ключевыми для расчета энергозатрат и производительности.

- Ветви и крона, хотя и влияют на сопротивление, часто не учитываются, так как их вклад в общее сопротивление может быть незначительным или компенсируется другими факторами.

4) Стандартизация:

- Хлысты имеют более предсказуемую форму и размеры по сравнению с целыми деревьями, что позволяет использовать стандартизированные параметры для моделирования (например, диаметр, длина, плотность).

- Это упрощает создание универсальных моделей, применимых для разных пород деревьев и условий.

5) Фокус на технологических процессах:

- В большинстве случаев моделирование направлено на анализ процессов трелевки, погрузки и транспортировки, где хлысты являются основным объектом.

- Моделирование целых деревьев может потребоваться только для специфических задач, таких как анализ валки или обработки кроны.

Использование хлыстов в моделях динамики обусловлено их практической значимостью, упрощением расчетов и соответствием реальным технологическим процессам. Однако для более детального анализа могут применяться модели целых деревьев.

При разработке математической модели трелемой пачки хлыстов были приняты следующие допущения:

- в трелемой пачке содержится несколько хлыстов одинаковой формы и объема;
- все хлысты приподнятой части пачки жестко крепятся к пачковому захвату (самозажимному коинку) технологического оборудования БПТМ;
- плотность и модуль упругости древесины всех хлыстов являются постоянными величинами.

При моделировании динамики движения БПТМ рассматривается контактное взаимодействие хлыстов с технологическим оборудованием (захватом) и опорным основанием трелевочного волока.

На конец пачки хлыстов, перемещающейся по опорному основанию, в плоскости опорной поверхности против скольжения действует сила сопротивления волочению P_B :

$$P_B = N_{\Pi} \cdot f_c \quad (2.78)$$

где N_{Π} – нормальная реакция пути на волочащуюся часть пачки;

f_c – коэффициент сопротивления волочению пачки.

В Таблице 16 представлены коэффициенты сопротивления волочению пачки при трелевке зимой, летом, за вершины и комли для хлыстов и деревьев.

Таблица 16.

Коэффициенты сопротивления волочению пачки при трелевке в зависимости от внешних условий

№	Наименование	Коэффициент f_c	
		хлыстами	деревьями
1. Трелевка зимой:			
1.1	По снежному покрову	0,10–0,15	0,12–0,18
1.2	По мерзлому грунту	0,15–0,25	0,18–0,30
2. Трелевка летом:			
2.1	По сухому грунту	0,25–0,35	0,30–0,40
2.2	По влажному грунту	0,35–0,50	0,40–0,60
3. Трелевка за вершины:			
3.1	Сопротивление увеличивается из-за большего контакта с грунтом	0,30–0,60	0,35–0,65
4. Трелевка за комли:			
4.1	Сопротивление меньше, чем при трелевке за вершины	0,20–0,40	0,25–0,45

В Таблице 17 представлены коэффициенты сопротивления волочению пачки для разных пород деревьев.

Таблица 17.

Коэффициенты сопротивления волочению пачки для разных пород деревьев

Группа пород	Порода	Время года	Коэффициент f_c
Хвойные	Сосна	Зимой	0,10–0,20
		Летом	0,25–0,40
	Ель	Зимой	0,12–0,22
		Летом	0,30–0,45
Лиственные	Берёза	Зимой	0,20–0,30
		Летом	0,45–0,60
	Осина	Зимой	0,18–0,28
		Летом	0,40–0,55

В среднем для хлыстов или деревьев трельюемых БПТМ по волоку принимаются следующие значения: зимой $f_c = 0,3 - 0,45$; летом $f_c = 0,4 - 0,8$.

Для формирования динамических моделей БПТМ и последующего моделирования динамики их движения в пакете программ Универсальный механизм, необходимо было выбрать эксплуатационные показатели деревьев в пачке, распространенных на участках рассматриваемой лесосеки, характеризуемые высотой 25 м и средним объемом хлыста $0,96 \text{ м}^3$ (Таблица 18).

Таблица 18.

Числовые значения усредненных основных эксплуатационных показателей деревьев

Диаметр на высоте 1,3 м [см]	Диаметр в месте спиливания [см]	Высота дерева [м]	Масса наземной части дерева [кг]	Средний объем хлыста [м^3]
32	38,4	25	900	0,96

Модель хлыста общей длиной 25 м представляет из себя последовательно шарнирно соединенные кусочно-линейные стержни длиной 5 м. (1-2 м усложняют расчеты без значительного увеличения точности; 10 м не учитывают изменение жесткости по длине). Разбиение на 5 м позволяет аппроксимировать изменение диаметра линейно на каждом участке. Каждый из стержней имеет точки контакта с опорной поверхностью. На Рис. 2.36 представлена модель пачки хлыстов, с указанием шарниров, центров масс и номера участка. В пачке содержится 7 хлыстов.

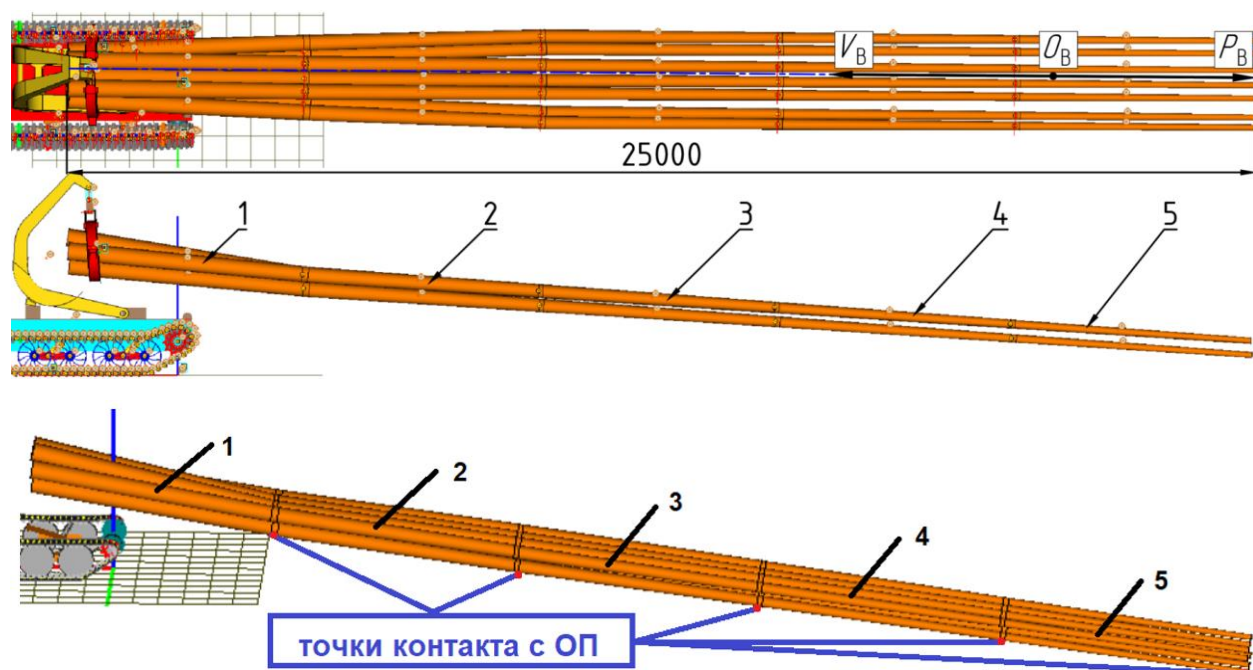


Рис. 2.36. Модель пачки хлыстов с указанием шарниров, центров масс и номера участка

Характеристики модели хлыста представлены в Таблице 19.

На Рис. 2.37 представлено трелевочное оборудование БПТМ – пачковый захват. Захват имеет возможность поворота за счет трех шарниров (1, 2, 3).

Таблица 19.

Характеристика хлыста

№ участка	Длина, м	Масса, кг
1	5	285
2		235
3		180
4		130
5		70
1-5	25	900

Хлыст при трелёвке подвергается: изгибу, колебаниям, трению между хлыстами в пачке. Разбиение на сегменты позволяет точнее учесть переменную жёсткость и массу.

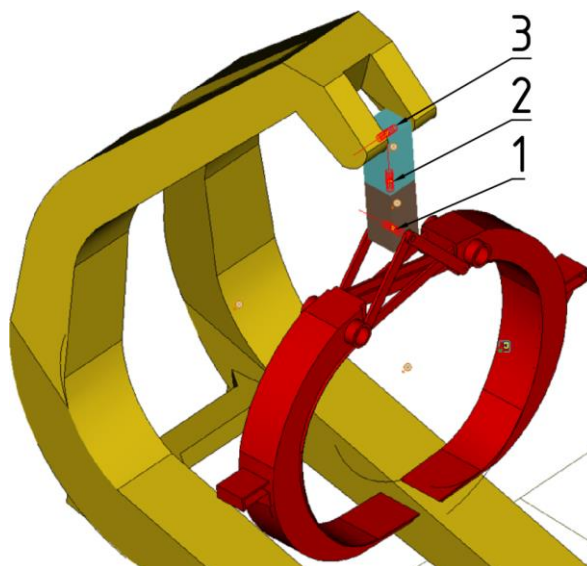


Рис. 2.37. Тела модели и шарниры пачкового захвата гусеничной БПТМ

2.7. Выводы по Главе 2

В главе разработаны имитационные математические модели движения колесных (КБПТМ) и гусеничных (ГБПТМ) беспилотных трелевочных машин с разными типами трелевочного оборудования для хлыстовой и сортиментной технологии лесозаготовок с учетом коллаборативной технологии трелевки.

Разработанные модели предназначены для определения на этапе проектирования показателей подвижности колесных и гусеничных БПТМ с разным типом трелевочного оборудования.

Для формирования уравнений динамики сложных механических систем применялись специализированные программные пакеты, включая: «Универсальный механизм», «ФРУНД», «Adams» и другие. Они обеспечивают автоматизированное формирование систем дифференциальных уравнений, описывающих движение элементов движителя и пачки хлыстов.

Особое внимание уделено моделированию контакта движителей с опорным основанием. Для гусеничных машин разработана модель, учитывающая разрывное распределение нормальных реакций под опорными катками, а для колесных машин взаимодействие с опорным основанием через эллиптическую зависимость.

Представлены уравнения Лагранжа первого рода для описания динамики систем твердых тел, включая уравнения свободного движения и уравнения связей. Модели учитывают как поступательное, так и вращательное движение элементов, а также их взаимодействие через упруго-демпфирующие элементы.

Разработаны математические модели для двух типов трелевочного оборудования: пачкового захвата и манипулятора с самозажимным коником. Модели включают детальное описание шарниров, центров масс и силовых взаимодействий.

Пачка хлыстов моделируется как система с распределенными параметрами, учитывающая транспортные, статические и динамические характеристики. Разработаны методы расчета сопротивления волочению, коэффициентов трения и взаимодействия с опорной поверхностью.

Разработанные модели позволяют оценивать максимальные эксплуатационные скорости, энергетические затраты, параметры управляемости и вибрационные нагрузки, что важно для проектирования и оптимизации БПТМ.

Глава 3. Экспериментальные исследования

В данной главе изложены методика, организация и итоги экспериментальных исследований. Подробно описаны объекты испытаний, применяемое оборудование, условия и способы проведения экспериментов.

3.1. Цель экспериментальных исследований

Основная цель – проверка достоверности разработанной математической модели, описывающей движение колесных и гусеничных трелевочных машин с частично погруженной или подвешенной пачкой деревьев (хлыстов).

3.2. Объект испытаний и аппаратурно-измерительный комплекс

Для оценки точности модели взаимодействия колесных и гусеничных движителей с опорной поверхностью были проведены натурные испытания. В исследованиях использовались:

- гусеничный трелевочный трактор ТБ-1М (Рис. 3.1), оснащенный самозажимным коником и манипулятором;
- гусеничный трелевочный трактор ЛТ-187 (Рис. 3.2) с пачковым захватом [125, 138].

Верификация математической модели колесной БПТМ осуществлялась на тракторе Вепрь 4x4 (Рис. 3.3) с тросочокерным оборудованием и скиддере JohnDeere 4x4 (Рис. 3.4) с пачковым захватом. Внешний вид объектов испытаний представлен на Рис. 3.1 – 3.4.

Основные технические характеристики рассматриваемых объектов испытаний представлены в Таблице 20 – 23.



Рис. 3.1. Гусеничный трелевочный трактор ТБ-1М с самозажимным коником и манипулятором

Таблица 20.

Технические характеристики трелевочного трактора ТБ-1М

Параметр	Значение
Масса, кг	12000
База, м	2,31
Колея, м	1,69
Радиус ведущего колеса, м	0,2
Ширина гусеницы, м	0,44
Дорожный просвет, м	0,555
Габаритная высота, мм	3490
Габаритная ширина, мм	2570
Габаритная длина, мм	7300
Максимальная мощность двигателя, кВт	73,6



Рис. 3.2. Гусеничный трелевочный трактор ЛТ-187 с пачковым захватом

Технические характеристики трелевочного трактора ЛТ-187

Параметр	Значение
Масса, кг	16080
Габаритная высота, мм	3990
Габаритная ширина, мм	2700
Габаритная длина, мм	6860
Максимальная мощность двигателя, кВт	95,5
Радиус ведущего колеса, м	0,32



Рис. 3.3. Колесный трактор «Вепрь» с тросочерным оборудованием

Технические характеристики колесного трактора «Вепрь»

Параметр	Значение
Масса, кг	4100
База, м	2,26
Колея, м	1,6
Максимальный крутящий момент двигателя, Нм	221
Максимальная мощность двигателя, кВт	45,6



Рис. 3.4. Колесный скиддер JohnDeere 748H с пачковым захватом

Таблица 23.

Технические характеристики колесного скиддера JohnDeere 748H

Параметр	Значение
Масса эксплуатационная, кг	19713
Площадь (раскрытие) пачкового захвата, м ² (мм)	1,48 (3251)
Высота транспортная, мм	3365
Длина транспортная, мм	8384
Дорожный просвет (min), мм	557
Ширина транспортная, мм	3239
Крутящий момент, Нм	1020
Мощность двигателя, кВт	172
Рабочий объем двигателя, л	6,8
Скорость движения (max), км/ч	25

В ходе экспериментальных исследований для сбора, обработки и мониторинга данных используется специализированное оборудование, перечень которого представлен в Таблице 24. Этот аппаратный комплекс позволяет оценивать параметры дорожно-грунтовых условий, а также проверять точность математических моделей, описывающих движение колесных и гусеничных трелевочных машин.

Таблица 24.

Состав аппаратно-измерительного комплекса

Оборудование	Назначение
Регистратор данных Racelogic Vbox	Фиксация скорости и координат машины с использованием GPS-приемника
Видеокамеры Racelogic	Визуальная фиксация и запись хода испытаний
Преобразователь ZET 7176	Конвертация интерфейса CAN 2.0 в USB
Блок питания 24В	Обеспечение электропитания оборудования
Соединитель ZET 7001	Подключение питающих цепей
Цифровой модуль ZET 7180-V	Подключение датчиков вращения колес и регистрация частоты их вращения
USB-ключ ZETKey	Расширение возможностей ПО ZETLAB
Ноутбук с кабелем USB 2.0	Обработка данных и управление измерительной аппаратурой
ПО ZETLAB	Контроль, обработка и сохранение результатов экспериментов

На Рис. 3.5 представлена схема объекта испытаний с расположением контрольно-измерительной аппаратуры.

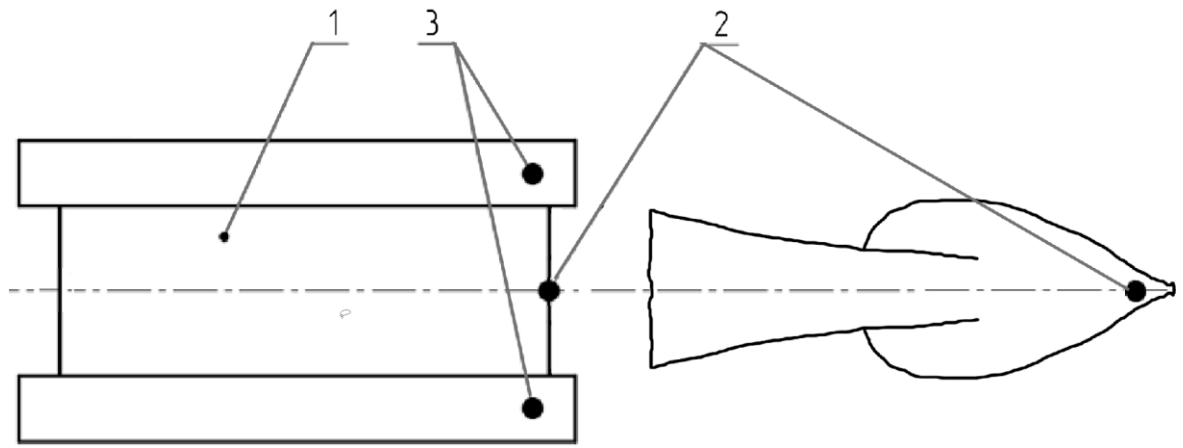


Рис. 3.5. Схема проведения испытаний

На гусеничной трелевочной машине (1) для замера частоты вращения ведущих колес установлены индуктивные датчики (3). В ходе испытаний применялась система Racelogic Vbox, фиксирующая траекторию и скорость движения машины и пачки хлыстов. GPS-приемники размещались на корпусе (2) (в точке пересечения продольной оси и оси ведущих колес) и на конце волочащейся части пачки для максимального расхождения координат.

В ходе проведения экспериментальных исследований были записаны соответствующие данные, которые в последующем сравнивались и использовались в модели.

3.3. Экспериментальные исследования движения колесных и гусеничных трелевочных машин. Верификация математических моделей

В ходе экспериментальных исследований в качестве опорной поверхности рассматривался «дернистый грунт». Для него справедливы зависимости коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения, которые применимы как к связанным, так и к несвязанным основаниям (2.17). Исходными параметрами являются $\mu_{sx\max}$ и $\mu_{sy\max}$ — коэффициенты сцепления соответственно в продольном и поперечном направлениях (параметры эллипса трения, см. рис. 2.3 а).

На основании экспериментальных данных [71], полученных при определении характеристик деформируемого грунтового основания (ДГУ) для гусеничного трелевочного трактора ТБ-1, были установлены следующие

значения: коэффициент сопротивления движению $f_{гр}$ на дернистом грунте составил 0,11, максимальные коэффициенты сцепления $\mu_{хmax} = 0,77$ и $\mu_{уmax} = 0,79$.

Представленные значения параметров ДГУ, применяются в качестве входных данных при проверке разработанной математической модели движения беспилотных трелевочных машин.

Рассмотрим методику проведения экспериментальных исследований для верификации математических моделей движения колесных и гусеничных трелевочных машин.

Для обеспечения достоверности результатов экспериментальных исследований необходимо четко следовать программе испытаний, которая включает несколько ключевых этапов.

1) Подготовка объектов испытаний

Перед началом экспериментов важно убедиться в исправности техники. Проводится проверка комплектности машин, их технического состояния, а также выполняется обкатка и регулировка механизмов. Дополнительно контролируется уровень топлива, масла и других технических жидкостей, поскольку их недостаток или несоответствие требованиям может исказить результаты испытаний.

2) Определение массы испытываемой машины

На этом этапе выполняется взвешивание техники с последующей фиксацией фактической снаряженной массы в протоколе испытаний. Этот параметр важен для последующего сопоставления экспериментальных данных с расчетными моделями.

3) Фиксация внешних условий

Климатические факторы могут существенно влиять на динамику движения машин, поэтому перед испытаниями измеряются:

- атмосферное давление;
- температура воздуха;
- относительная влажность.

Все данные заносятся в протокол.

Важные ограничения:

- испытания проводятся только в светлое время суток;
- исключаются осадки (дождь, туман), а также сильный ветер (свыше 3 м/с с порывами более 5 м/с);
- не допускаются резкие изменения состояния опорной поверхности (грунта), так как это может повлиять на устойчивость и управляемость машин.

4) Подготовка измерительного оборудования

Перед началом испытаний производится монтаж и настройка датчиков, систем регистрации данных и другого измерительного оборудования. От точности их работы зависит достоверность получаемых результатов.

5) Проведение экспериментальных заездов

На завершающем этапе выполняются непосредственные испытания движения колесных и гусеничных трелевочных машин. Полученные данные сравниваются с расчетными показателями математических моделей, что позволяет оценить их точность и при необходимости скорректировать.

Движение трелевочных машин осуществляется на трелевочном волокне по прямолинейным и криволинейным траекториям [13]. В работе для верификации разработанной математической модели при проведении испытаний обоснован выбор траектории поворота окружности с $R=10\text{м}$, $R=30\text{м}$ и криволинейная траектория при выезде с пасечного на магистральный волок, как наиболее характерные для учета всех особенностей движения БПТМ согласно технологии лесозаготовок. При маневрировании машина может двигаться по сложным траекториям, таким как «синусоида» или «змейка», с переменной кривизной и частой сменой ее знака. Это приводит к значительным изменениям нагрузки на элементы трансмиссии из-за резкого колебания инерционного момента при движении по траекториям с переменной кривизной [28].

Параметры криволинейного движения фиксировались с помощью двух программно-измерительных комплексов. В состав первого комплекса входит два комплекта «RaceLogic» - устройство измерения ускорения, скорости,

пройденного пути и определения в пространстве на основе технологии GPS движущейся трелевочной машины и пачки деревьев (Рис. 3.6).



а)



б)

Рис. 3.6. Установленный программно-измерительный комплекс «RaceLogic»:

а) Гусеничный трелевочный трактор ТБ-1М, б) Колесный трактор «Вепрь»

В состав второго измерительного комплекса «ZetLab» входит комплект из индуктивных датчиков, размещенных на ведущих колесах и аналого-цифрового преобразователя, подключенного к компьютеру (Рис. 3.7).

Исходные данные для разработанных математических моделей учитывают характеристики исследуемых машин, определенных параметров ДГУ и пачки деревьев (хлыстов) ($f_c = 0,6$).



Рис. 3.7. Программно-измерительный комплекс определения угловой скорости вращения ведущих колес гусеничного трелевочного трактора

Для проведения испытаний было размечено три участка пути: $R=10$ м, $R=30$ м и криволинейная траектория, характеризующаяся изменением знака кривизны. Во время испытаний гусеничный трелевочный трактор двигался на первой передаче с максимальным нажатием на педаль подачи топлива. Для следования заданной траектории использовался борт-фрикционный механизм поворота без изменения положения педали газа.

На Рис. 3.8 и 3.9 представлены фрагменты проведения экспериментальных исследований гусеничного трелевочного трактора.



Рис. 3.8. Фрагменты проведения экспериментальных исследований на гусеничном трелевочном тракторе



Рис. 3.9. Фрагменты проведения экспериментальных исследований на гусеничном трелевочном тракторе, полученные с измерительного комплекса Racelogic VBox

Для точной фиксации параметров движения применялся специализированный измерительный комплекс Racelogic VBox, который обеспечивает:

- высокоточное определение координат (с погрешностью менее 0,1 м);
- измерение мгновенной скорости с частотой дискретизации 100 Гц;

- синхронную запись пространственного положения и динамических характеристик.

На Рис. 3.10 представлены экспериментально полученные данные, включающие:

- траекторию движения: фактический путь, пройденный трелевочным трактором ТБ-1М при выполнении поворота радиусом 10 метров;
- скоростные характеристики: изменение скорости в процессе выполнения маневра.

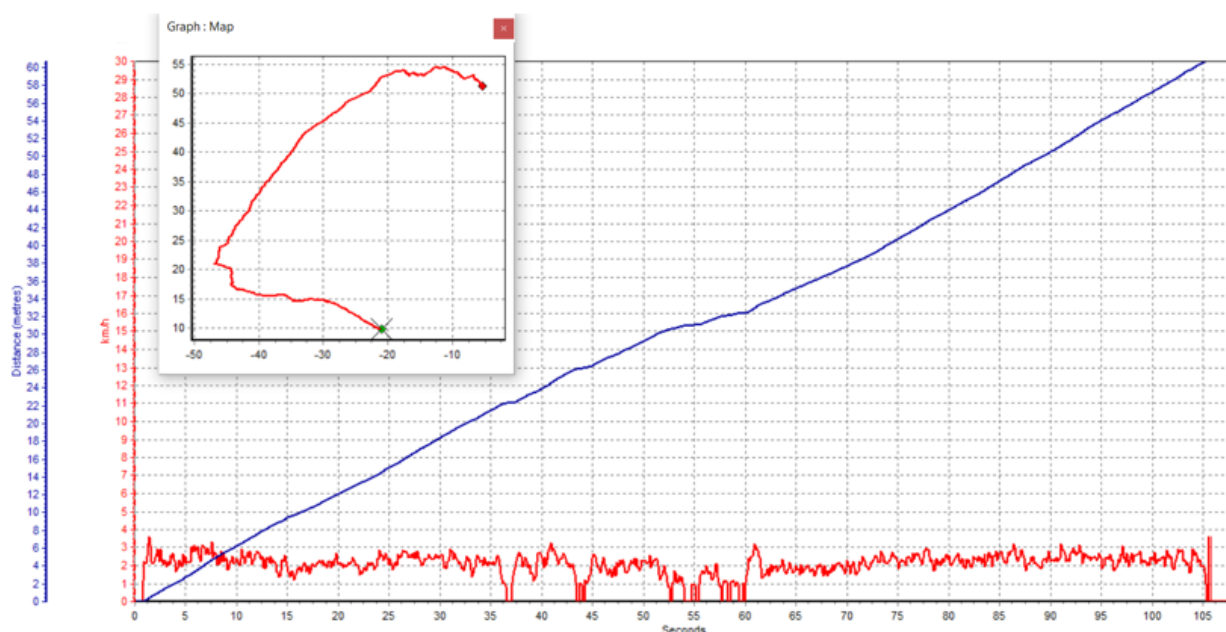


Рис. 3.10. Скорость и траектория движения гусеничного трелевочного трактора ТБ-1М при повороте $R=10\text{м}$

Начальный участок соответствует прямолинейному движению с постоянной скоростью. Участок поворота характеризуется изменением траектории при сохранении тягового усилия. Зафиксированы незначительные колебания скорости, обусловленные особенностями взаимодействия гусениц с грунтом.

На Рис. 3.11 и 3.12 представлены фрагменты проведения экспериментальных исследований колесного трактора «Вепрь».



Рис. 3.11. Фрагменты проведения экспериментальных исследований на колесном тракторе «Вепрь»



Рис. 3.12. Фрагменты проведения экспериментальных исследований на колесном тракторе «Вепрь», полученные с измерительного комплекса Racelogic Vbox

На Рис. 3.13 представлен пример графика траектории и скорости движения колесного трактора «Вепрь» полученные с измерительного комплекса Racelogic Vbox при проведении натурного эксперимента.

На Рис. 3.14 представлен фрагмент проведения экспериментальных исследований движения колесного скиддера JohnDeere 748H. На Рис. 3.15 представлен пример графика траектории и скорости движения колесного

скиддера JohnDeere 748H полученные с измерительного комплекса Racelogic Vbox.

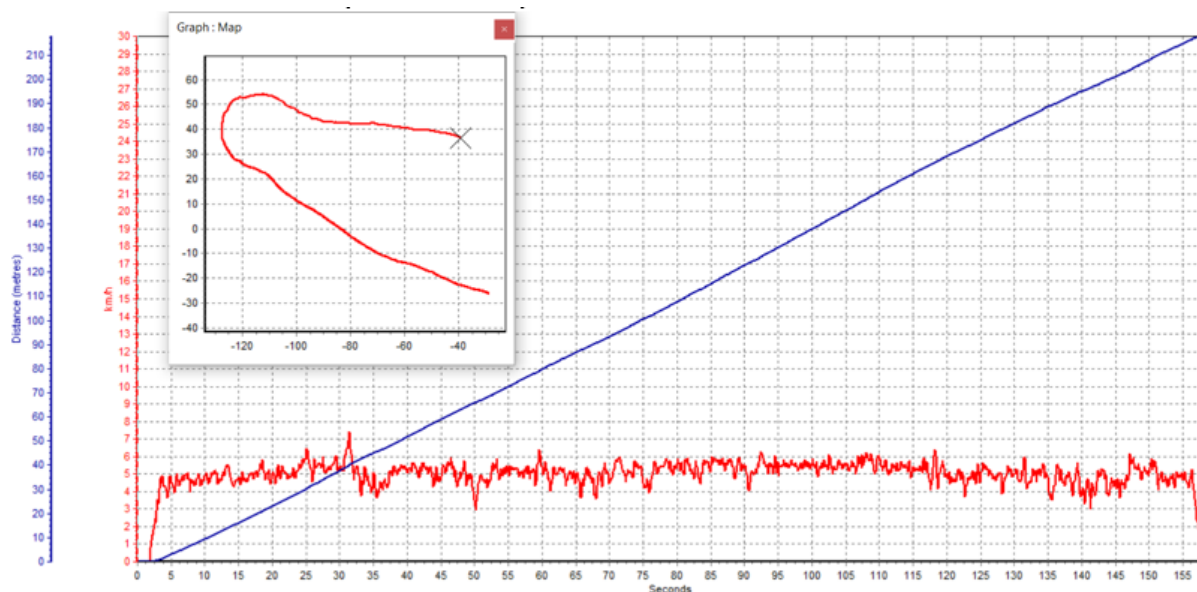


Рис. 3.13. Скорость и траектория движения колесного трактора «Вепрь» при повороте $R=10\text{м}$



Рис. 3.14. Фрагменты проведения экспериментальных исследований на колесном скидере JohnDeere 748H, полученные с измерительного комплекса Racelogic Vbox

В представленном исследовании проведено комплексное сравнение фактических траекторий движения гусеничных беспилотных трелевочных машин (БПТМ), зафиксированных при помощи высокоточного GPS-модуля

системы RaceLogic, с расчетными траекториями, полученными в результате компьютерного моделирования (Рис. 3.16 – 3.18).

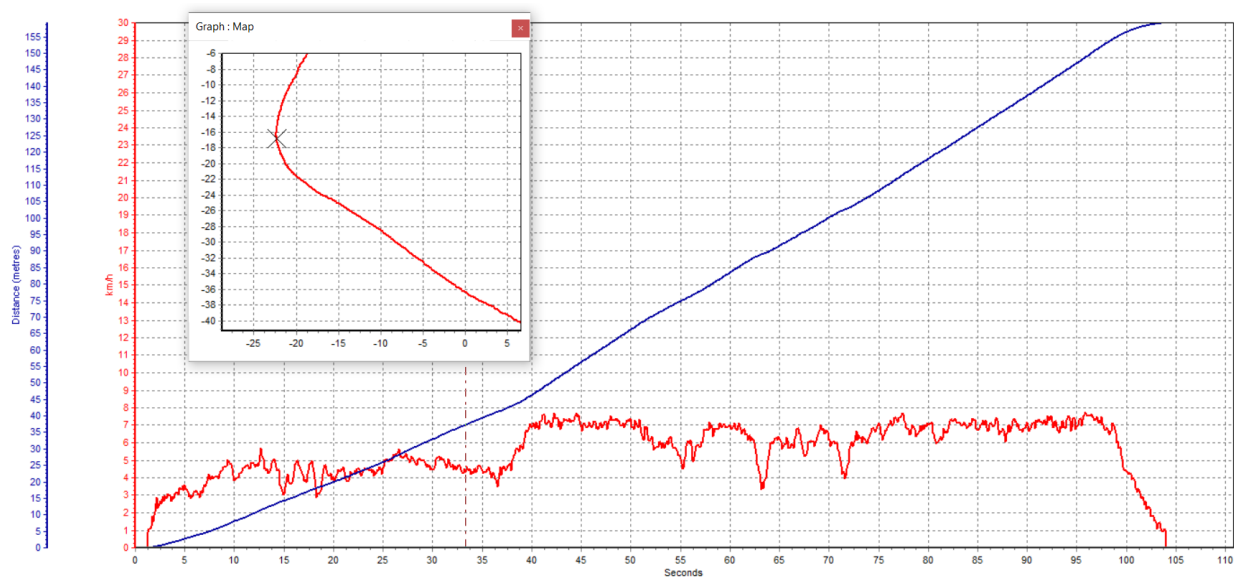


Рис. 3.15. Скорость и траектория движения колесного скиддера JohnDeere 748H при повороте $R=10\text{м}$

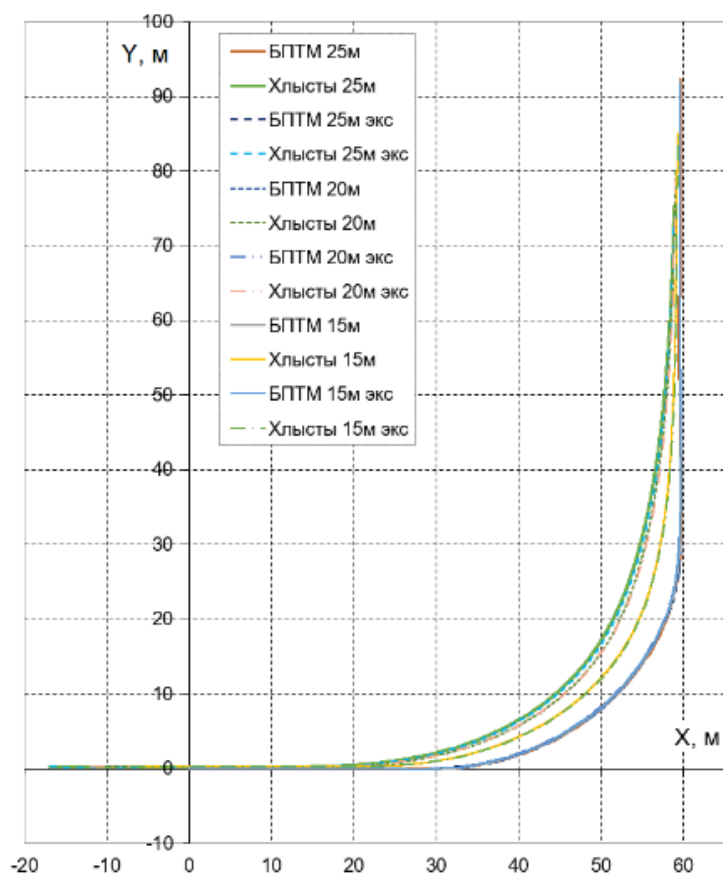


Рис. 3.16. Траектории движения гусеничной трелевочной машины и пачки деревьев разной длины (25м, 20м и 15м), полученные экспериментально и по результатам математического моделирования при повороте на магистральном волоке $R=30\text{ м}$;

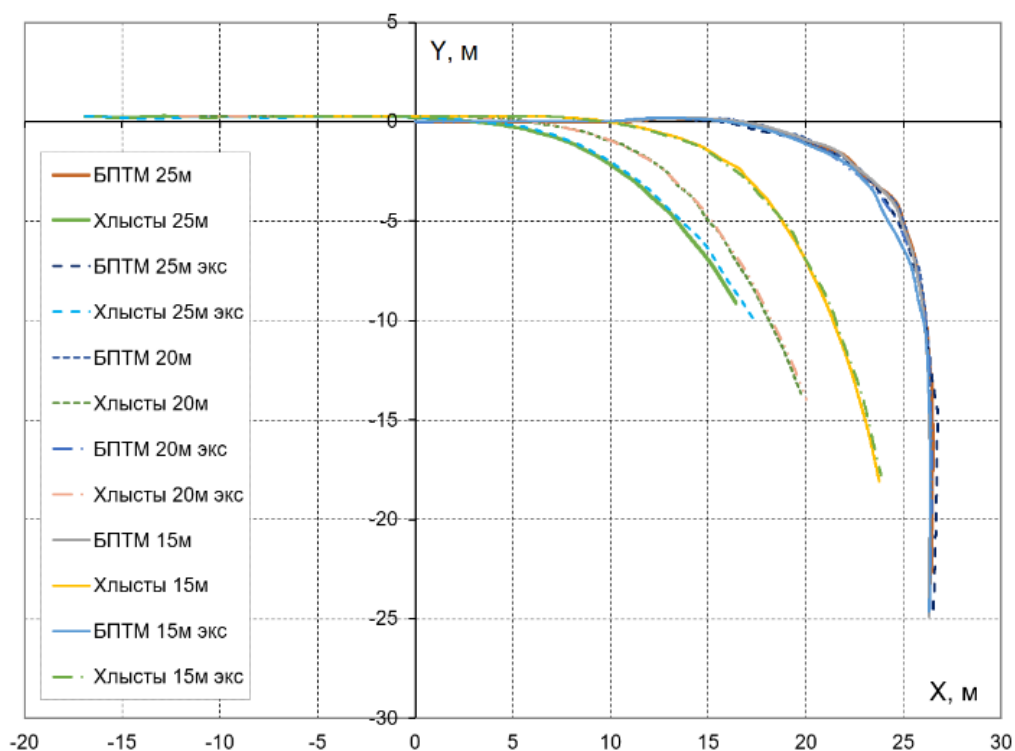


Рис. 3.17. Траектории движения гусеничной трелевочной машины и пачки деревьев разной длины (25м, 20м и 15м), полученные экспериментально и по результатам математического моделирования при повороте на пасечном волоке $R=10$ м

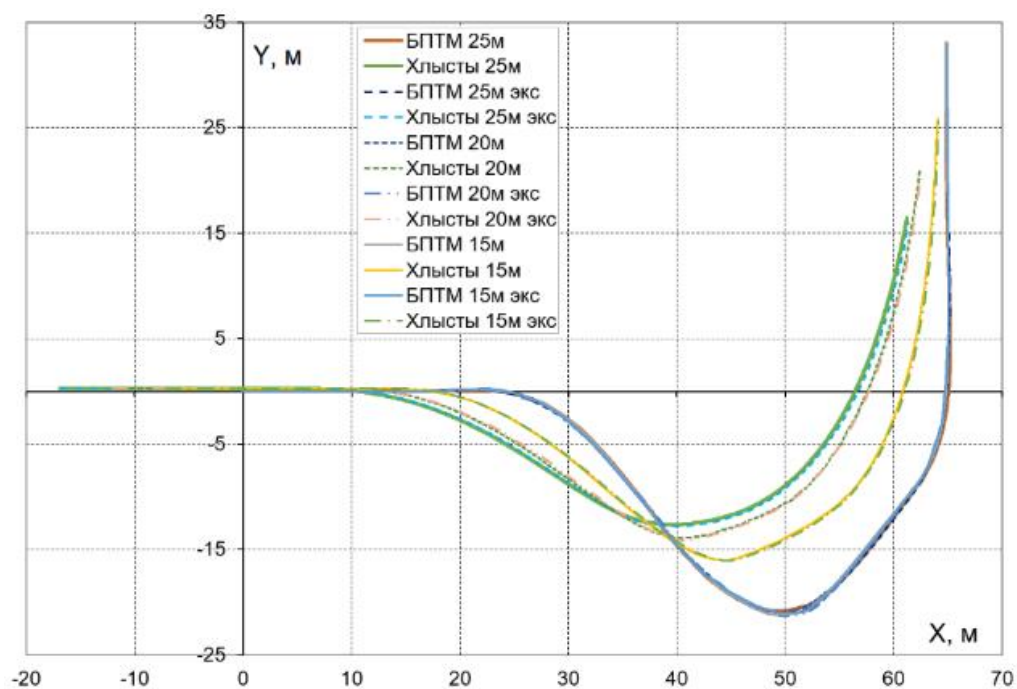


Рис. 3.18. Траектории движения гусеничной трелевочной машины и пачки деревьев разной длины (25м, 20м и 15м), полученные экспериментально и по результатам математического моделирования при криволинейной траектории движения

Сравнение результатов математического моделирования и эксперимента показало, что максимальное отклонение траекторий машины и пачки деревьев не превышает 16% от средних значений.

В ходе моделирования были детально проанализированы ключевые динамические параметры движения. Кинематические характеристики включали разницу в частоте вращения ведущих колес левого и правого бортов, а также изменение линейной скорости машины. Силовые параметры охватывали усилие, возникающее в пачке деревьев при движении. Для верификации точности математической модели проводилось тщательное сравнение расчетных данных с результатами натурных испытаний, включая анализ экспериментальных осциллограмм, приведенных в научных источниках [38, 63, 173]. Погрешность измерений угловой скорости ведущих колес не превысила 8% от среднего значения.

Результаты исследования доказали эффективность разработанной математической модели для комплексного анализа динамики криволинейного движения как груженных (с пачкой деревьев различной длины), так и порожних машин на дернистом грунте. Полученные данные имеют существенную практическую ценность, позволяя оптимизировать конструктивные решения трелевочных машин, совершенствовать системы управления БПТМ и повышать точность прогнозирования рабочих характеристик техники в различных эксплуатационных условиях.

Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования подтвердило адекватность математической модели: относительная погрешность по координатам корпуса машины и пачки деревьев, измеренным с помощью Racelogic Vbox и GPS-приемника, составила менее 16%.

3.4. Выводы по Главе 3

Для верификации математической модели движения колесной и гусеничной трелевочной машины разработана методика проведения экспериментальных исследований.

При проведении экспериментальных исследований движения колесных и гусеничных трелевочных машин были получены записи изменения частоты вращения ведущих колес левого и правого борта гусеничной трелевочной машины, силы в пачке хлыстов и данные в виде скоростей и траекторий движения полученные с программно-измерительного комплекса «RaceLogic».

Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетного моделирования показало, что математическая модель является достоверной, поскольку отклонение по координатам корпуса трелевочной машины и пачки деревьев, зафиксированным с использованием Racelogic Vbox и GPS-приемника, не превышает 16%.

При этом в ходе эксперимента максимальная погрешность измерения угловой скорости ведущих колес гусеничной трелевочной машины составила менее 8% от среднего значения.

Разработанная модель движения колесных и гусеничных трелевочных машин с пачкой хлыстов и в порожнем состоянии пригодна для исследования динамики криволинейного движения БПТМ по опорному основанию типа «дернистый грунт».

Глава 4. Разработка виртуальной лесосеки для моделирования трелевочных операций с параметризированными характеристиками дорожно-грунтовых условий

4.1. Общие сведения о разработке лесосек

Основным документом, регламентирующим разработку лесосеки, служит технологическая карта (Рис. 4.1). В ней фиксируются все ключевые особенности лесосеки, влияющие на производственный процесс. Карта включает схему разработки, описание характеристик участка, применяемую технологию лесозаготовок и производственные нормативы.

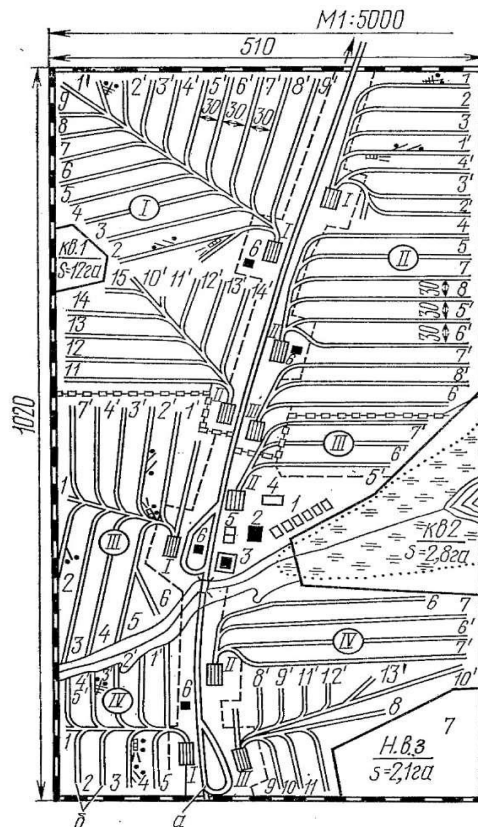


Рис. 4.1. Пример технологической карты разработки лесосеки:

I, II, III, IV - номера бригадных делянок; а - ус лесовозной дороги; б - волоки;

1'...15' - последовательность разработки пасек; 1 - стоянка машин; 2 - слесарно-инструментальное помещение; 3 - место для ГСМ; 4 - столовая; 5 - домик мастера; 6 - бригадный домик; 7 - неэксплуатационный выдел лесосеки

Схема разработки создается на основе обследования лесосеки, в ходе которого анализируются ее форма, размеры, тип грунта, рельеф, состав древостоя, наличие подроста, расположение дорог, водоемов и болот. С учетом этих факторов выбирается оптимальный способ освоения участка. На схеме обозначаются границы лесосеки, лесовозные усы, делянки, верхние склады или погрузочные пункты, направление трелевки (волоки), границы пасек, участки с подростом, размещение мастерского участка, последовательность обработки пасек и зоны безопасности.

Характеристика лесосеки включает данные о площади эксплуатационного участка, объеме ликвидной древесины, породном составе, среднем размере хлыста и наличии подроста. Технологические указания содержат рекомендации по организации работ: порядок проведения подготовительных операций, валки деревьев, трелевки, обрезки сучьев и погрузки на транспорт.

4.2. Характеристики дорожно-грунтовых условий виртуальной лесосеки

При выполнении операций по сбору и транспортировке пачек хлыстов трелевочные машины сталкиваются с разнообразными дорожными условиями. Их работа требует высокой проходимости и способности поддерживать достаточную скорость движения на различных типах поверхности.

При подъезде к пачке деревьев (хлыстов) машина вынуждена преодолевать заболоченные участки, покрытые порубочными остатками, а также такие препятствия, как пни, валуны, валежник и другие неровности. Во время транспортировки пачки условия пути могут варьироваться от размокшего грунта до асфальтированных дорог общего пользования. Кроме того, лесные дороги отличаются нестабильностью, которая зависит от климатических факторов, применяемой технологии заготовки, а также частоты проезда трелевочной машины по одному месту.

Ещё одной особенностью лесных грунтов является наличие большого количества веток, сучьев, молодой поросли и тонкомера, которые укрепляют слабый грунт, придавая ему амортизирующие свойства и повышая несущую

способность [94]. Из-за обилия препятствий колеи трелевочных машин часто имеют извилистую форму, а разница в глубине между правой и левой колеей может достигать 40–60 см [60, 168, 169, 193].

Дорожно-грунтовые условия для колесных и гусеничных БПТМ определяются набором статистических данных, включающих геометрические и физико-механические параметры: угол подъема и спуска, кривизна траектории, характеристики микропрофиля, а также показатели взаимодействия движителя с поверхностью, тяговые и энергетические свойства [113, 127 162, 163, 183, 184]. В большинстве случаев эти параметры носят случайный характер и анализируются на основе имеющихся статистических сведений [25, 40, 132, 155, 161].

Для определения основных значимых показателей колесных и гусеничных БПТМ была разработана виртуальная лесосека и сформирована программа испытаний на её участках. Разработанная виртуальная лесосека для моделирования трелевочных операций с параметризованными характеристиками ДГУ представлена на Рис. 4.2. В основе лежит схема разработки деланки виртуальной лесосеки с использованием ВПМ и БПТМ с указанием основных участков движения БПТМ при повороте на магистральном и пасечном волоке, а также участок движения БПТМ по криволинейной траектории. Лесосека разработана в соответствии с лесоводственными требованиями к технологическим процессам лесосечных работ (Приказ №314 от 29.11.1993г.), правил по охране труда в лесозаготовительном, деревообрабатывающем производствах и при проведении лесохозяйственных работ (Приказ №644н от 23.09.2020г.), Приказа Минприроды России №23 от 17.01.2022г. и на основе цикла работы БПТМ включающего в себя: 1) Холостой ход – БПТМ в порожнем состоянии первый раз движется по волоку (траектории) до места сбора пачки деревьев (при этом определяется и фиксируется скоростной режим по пути с учетом ограничений по безопасности и кривизна пути); 2) Технологическая операция – сбор пачки деревьев; 3) Рабочий ход – БПТМ с пачкой деревьев движется по волоку обратно с места сбора до верхнего склада (учитывается длина пачки деревьев, БПТМ движется по траектории с

минимальными отклонениями от нее и с высокой энергоэффективностью при этом определяется и фиксируется скоростной режим по пути с учетом ограничений по безопасности и кривизна пути); 4) Технологическая операция – разгрузка пачки деревьев на верхнем складе и окучивание их в штабель; 5) Холостой ход – повторение цикла работ (с изменением характеристик участка пути, по которому движется БПТМ в связи с предыдущим проходом машины).

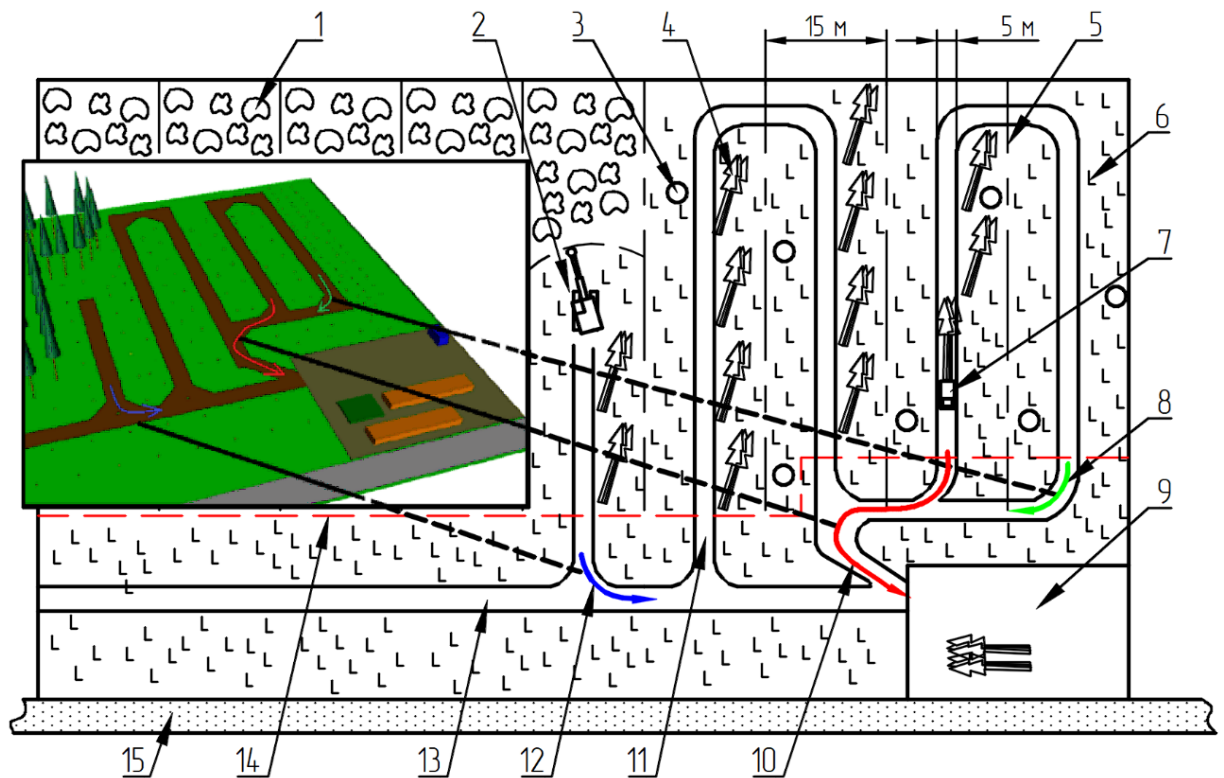


Рис. 4.2. Схема разработки виртуальной лесосеки ВПМ и БПТМ:

1 – сохраненный подрост; 2 – ВПМ; 3 – семенные деревья; 4 – пачки деревьев; 5 – граница лент; 6 – спиленные деревья; 7 – БПТМ; 8 – поворот БПТМ на пасечном волоке ($R=10\text{м}$); 9 – лесопогрузочный пункт; 10 – криволинейная траектория выезда БПТМ с пасечного на магистральный волок; 11 – пасечный волок; 12 – поворот БПТМ на магистральном волоке ($R=30\text{м}$); 13 – магистральный волок; 14 – зона безопасности; 15 – лесовозный ус

В описанных выше документах представлены основные требования к трелевочному волоку:

- ширина подготовленного волока - не менее 5 м;
- ширина волоков, проложенных по косогору - не менее 7 м;

- примыкание пасечных волоков (коридоров) к магистральным осуществляется плавно по дуге в соответствии с углом поворота;
- радиус поворота магистрального волока - не менее 30 м;
- радиус поворота пасечного волока - не менее 10 м.

При движении с пачкой деревьев (хлыстов) необходимо избегать крутых поворотов и объезжать высокие пни, валуны, ямы и другие препятствия.

Разработанная модель виртуальной лесосеки содержит специальные участки, предназначенные для оценки ключевых показателей БПТМ. Среди этих параметров анализируются:

- профильная проходимость (способность техники преодолевать неровности рельефа);
- маневренность (удобство управления и поворотливость);
- автономность (длительность работы без дозаправки или обслуживания);
- устойчивость (стабильность машины на сложных поверхностях);
- эффективность выполнения технологических операций (производительность в рабочих процессах).

Данная модель основана на исследованиях, представленных в научных источниках [5, 20, 147, 209, 210, 211].

В качестве параметризованных характеристик ДГУ были выбраны: геометрические и физико-механические характеристики. Геометрические характеристики включают микропрофиль (единичные препятствия), макропрофиль опорной поверхности (углы крена, подъема и спуска), кривизна и протяженность траектории движения по волоку. Физико-механические характеристики включают коэффициент взаимодействия (эллипс трения движителя и пачки хлыстов) и коэффициент сопротивления движению (разыгрываются при проходе машины по волоку) [19, 20, 22, 23, 49, 64].

Наиболее характерные природно-производственные условия эксплуатации лесозаготовительных машин – движение по пасечному волоку:

коэффициент сопротивления движению $f = 0,14 \dots 0,16$;

коэффициент сцепления $\varphi = 0,62 \dots 0,70$;

коэффициент сопротивления качению $f = 0,090$.

В Таблице 25 представлены изменения коэффициента сопротивления движению (f) и коэффициента сцепления (μ) от проходов используемые при моделировании на виртуальной лесосеке.

На Рис. 4.3 представлены ДГУ виртуальной лесосеки: 1) Поворот на магистральном волоке $R=30$ м; 2) Поворот на пасечном волоке $R=10$ м; 3) Выезд с пасечного на магистральный волок по криволинейной траектории; 4) Прямолинейное движение; 5) Микропрофиль пути и единичные препятствия; 6) Углы подъема, спуска и крена.

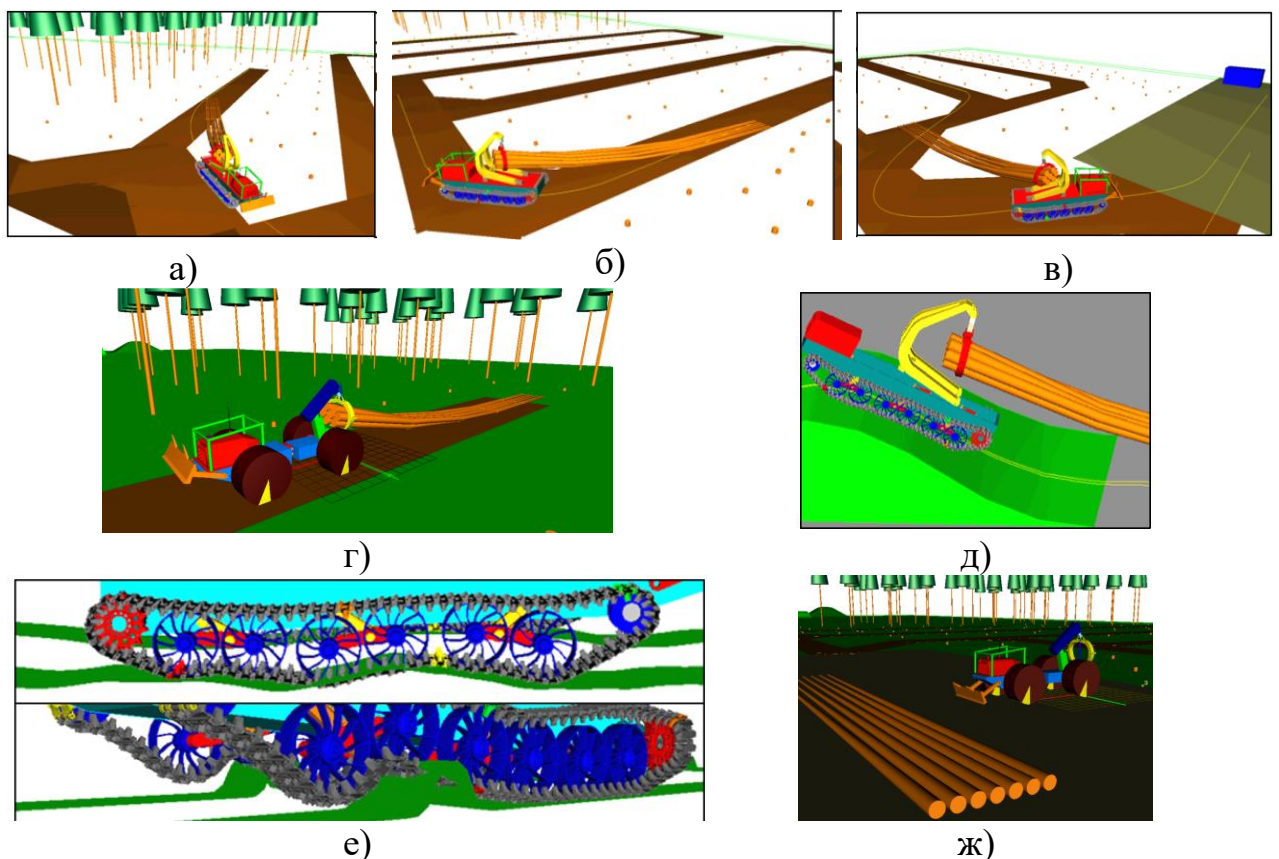


Рис. 4.3. Участки виртуальной лесосеки: а) поворот магистрального волока $R=30$ м; б) поворот пасечного волока $R=10$ м; в) криволинейная траектория движения; г) прямолинейная траектория; д) подъемы, спуски и крены; е) микропрофиль трелевочного волока, единичные неровности; ж) технологические операции

Также была разработана виртуальная лесосека для выполнения рубок ухода, характеризуемая в соответствии с требованиями документов к трелевочному волоку при выполнении рубок ухода и т.д. [52].

Участок, где эксплуатируется техника (например, трелевочный волок), анализируют с помощью пенетрометра, замеряя конусный индекс грунта в различных точках. Затем сравнивают полученные данные с параметрами воздействия движителя (чаще всего глубину колеи z , реже – степень уплотнения почвы), его рабочими показателями (коэффициенты сопротивления движению, сцепления и тяги), а также характеристиками самого движителя: шириной колеса B , диаметром D , нагрузкой G_w , высотой шины H_T и её радиальной деформацией h_z . На основе этих данных формируют WES-модели, которые по сути являются аналогами регрессионных уравнений. Эти модели позволяют прогнозировать влияние движителя на грунт и его эксплуатационные параметры, используя лишь значения конусного индекса и характеристики движителя [161].

При многократных проходах колесных и гусеничных машин по грунту происходят значительные изменения коэффициента сопротивления движению f и коэффициента сцепления μ , которые зависят от типа машины, свойств грунта и интенсивности нагрузки. [113, 118]

Коэффициент сопротивления движению f отражает силу, необходимую для преодоления сопротивления качению или перемещению. У колесных машин на рыхлых грунтах (песок, снег) первые проходы приводят к уплотнению, из-за чего f возрастает, но после образования плотной колеи сопротивление может снизиться. На пластичных грунтах (глина, влажная почва) f неуклонно растет из-за накопления деформаций и разрушения структуры. Гусеничные машины изначально имеют меньшее сопротивление благодаря распределению нагрузки [162]. На связных грунтах f может снижаться из-за уплотнения, а на рыхлых – увеличиваться из-за разрыхления поверхностного слоя.

Коэффициент сцепления (μ) определяет способность машины передавать тяговое усилие без пробуксовки. У колесных машин μ вначале высокий, особенно на рыхлых грунтах, где колеса зацепляются за неровности. Однако при повторных проходах сцепление ухудшается из-за сглаживания поверхности, а на переувлажненных грунтах может резко упасть. Гусеничные машины

демонстрируют более стабильное сцепление благодаря большой площади контакта, но на переувлажненных грунтах μ также снижается из-за заиливания.

Таблица 25.

Изменения коэффициента сопротивления движению (f) и коэффициента сцепления (μ) от проходов трелевочной машины по волоку

Проход	Направление	Колесная БПТМ		Гусеничная БПТМ	
		f	μ	f	μ
1	С грузом (вперед)	0,12	0,45	0,08	0,55
1	Без груза (назад)	0,10	0,50	0,07	0,60
2	С грузом (вперед)	0,14	0,40	0,09	0,50
2	Без груза (назад)	0,12	0,45	0,08	0,55
3	С грузом (вперед)	0,16	0,35	0,10	0,45
3	Без груза (назад)	0,14	0,40	0,09	0,50

Наибольшие изменения f и μ происходят на пластичных и рыхлых грунтах, тогда как на плотных и сухих они минимальны.

4.3. Участки виртуальной лесосеки для оценки профильной проходимости

Для анализа профильной проходимости на виртуальной модели лесосеки были созданы специализированные участки, позволяющие определить значения ключевых параметров, рассмотренных в Главе 1. К ним относятся: предельные углы спуска, подъема и косогора, максимальная высота преодолеваемых единичных препятствий (например, поваленных деревьев и пней), а также предельная высота вертикального уступа и контрэскарпа.

В Главе 1 на основе анализа условий эксплуатации и технологических особенностей трелевочных машин, а также их конструктивных решений, были установлены следующие показатели профильной проходимости: максимальный угол спуска и подъема – 25° , угол косогора – 15° . На Рис. 4.4 показаны фрагменты виртуальной лесосеки, предназначенные для оценки этих параметров.

Для определения максимальной высоты единичных препятствий (поваленных деревьев и пней) в виртуальную лесосеку включен участок с последовательно расположенными препятствиями. Их высота и ширина начинаются от 0,1 м, увеличиваясь с шагом 0,1 м для каждого последующего элемента. Фрагменты участков для определения предельной высоты поваленного дерева и пня представлены на Рис. 4.5 и Рис. 4.6 соответственно. Моделирование движения машины выполняется поэтапно, пока она не утратит подвижность при преодолении очередного препятствия.

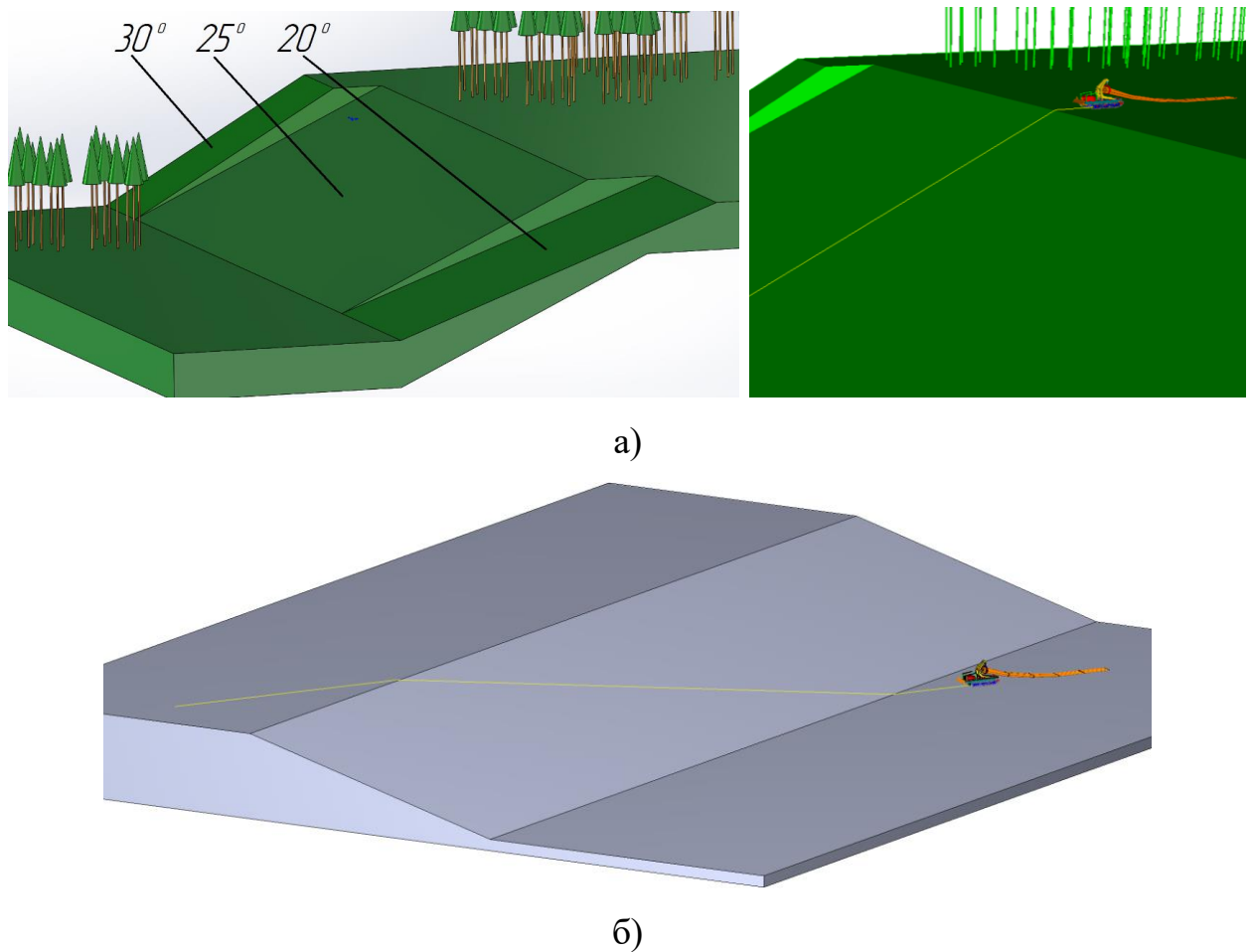


Рис. 4.4. Отдельные участки виртуального испытательного полигона для оценки профильной проходимости: а) – участок с изменяемым углом наклона для определения максимально допустимого угла подъема и спуска; б) – участок с боковым уклоном (косогором) для оценки устойчивости техники на склонах

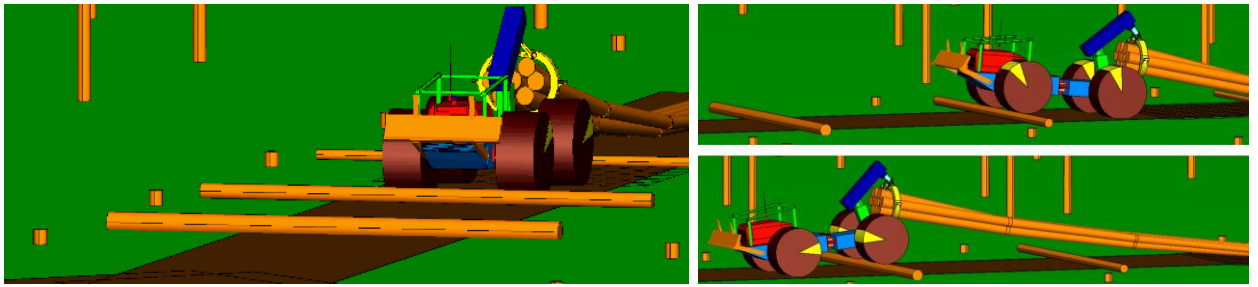


Рис. 4.5. Часть виртуальной лесосеки, моделирующая препятствие в виде поваленного дерева

Данный фрагмент позволяет определить максимальную высоту ствола, которую машина способна преодолеть без потери управляемости.

Для тестирования предельных возможностей техники при преодолении вертикальных препятствий в модель добавлен специальный участок с последовательно увеличивающимися уступами. Начальная высота препятствия составляет 0,4 м, а каждый последующий элемент становится выше на 0,1 м. Соответствующий фрагмент представлен на Рис. 4.7.

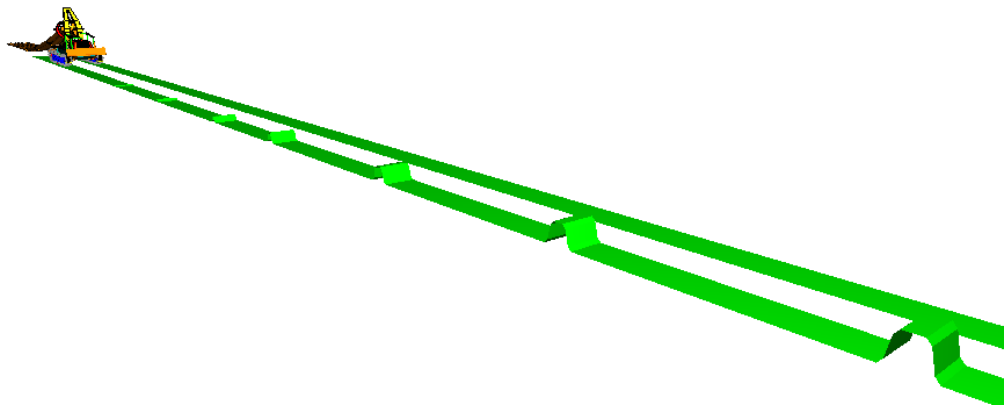


Рис. 4.6. Элемент виртуальной лесосеки, имитирующий пень различной высоты

Данный участок виртуальной лесосеки необходим для определения максимального размера пня, который может преодолеть машина.

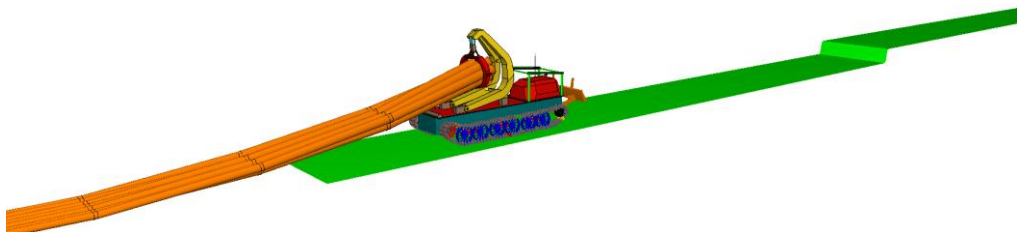


Рис. 4.7. Фрагмент виртуальной лесосеки с уступами разной высоты, используемый для оценки способности техники преодолевать вертикальные препятствия

Предельная высота контрэскарпа определяется на специальном участке виртуальной лесосеки с углом наклона стенок 80° относительно горизонтали. Начальная высота составляет 0,5 м с увеличением на 0,1 м для каждого следующего элемента. Соответствующий фрагмент представлен на Рис. 4.8.

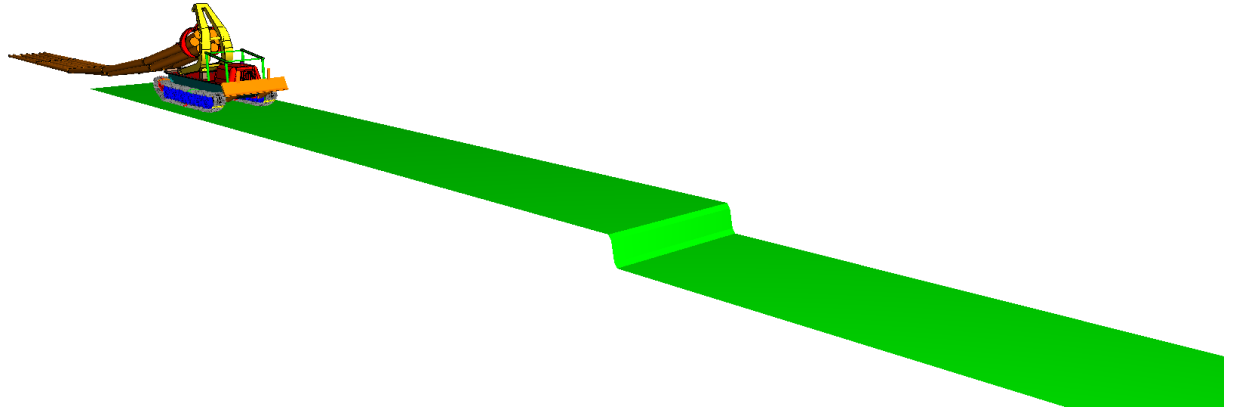


Рис. 4.8. Фрагмент участка виртуальной лесосеки для определения предельной высоты преодолеваемого контрэскарпа

На основе экспериментальных данных полученных в ходе замеров микропрофиля пути трелевочного волокна был сформирован участок виртуальной лесосеки. На Рис. 4.9 представлена характеристика микропрофиля (неровности пути) для левой и правой гусеницы.

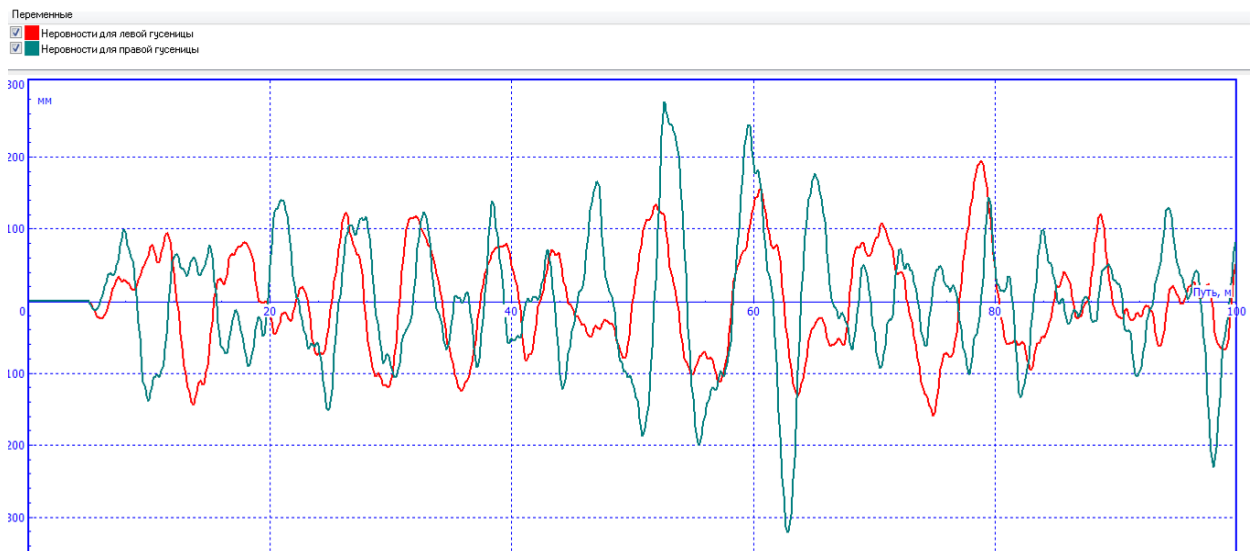


Рис. 4.9. Неровности пути для левой и правой гусеницы

На Рис. 4.10 представлен фрагмент участка микропрофиля виртуальной лесосеки.

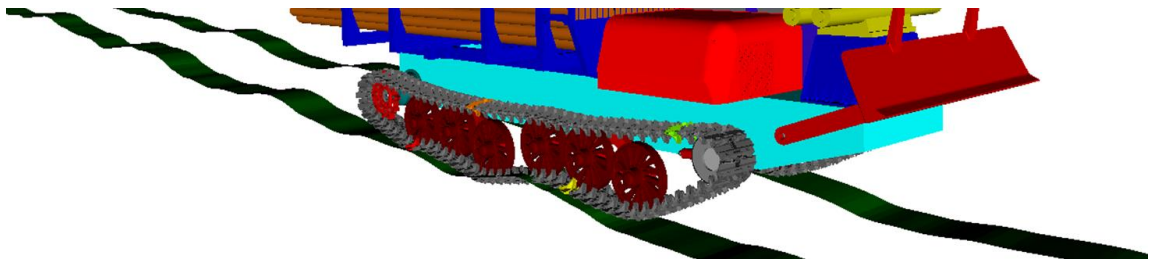


Рис. 4.10. Фрагмент участка виртуальной лесосеки с микропрофилем

4.4. Выводы по Главе 4

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

Разработанная модель виртуальной лесосеки для моделирования трелевочных операций с параметризованными характеристиками ДГУ включает участки для определения показателей БПТМ: профильной проходимости, маневренности, автономности, устойчивости, эффективности выполнения технологических операций.

Для оценки профильной проходимости в виртуальной модели лесосеки были созданы специальные зоны, позволяющие оценить ключевые параметры: предельные углы подъёма, спуска и бокового крена, наибольшую высоту преодолеваемых одиночных препятствий (таких как упавшие деревья и пни), а также максимально допустимую высоту вертикального уступа и контрэскарпа.

Глава 5. Разработка законов управления движением беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин

В главе 5 представлены разработанные законы управления движением беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин.

Эффективность предложенных законов подтверждена путем имитационного математического моделирования. В исследовании рассматривались шарнирно-сочлененная колесная машина 4×4, а также гусеничные трелевочные машины с различными типами трелевочного оборудования. Результаты, демонстрирующие преимущества предложенных законов, приведены в заключительном разделе работы.

Один из способов сокращения затрат является программное управление движением трелевочной машины с учетом энергоэффективности и безопасности [35, 70, 108]. Этот подход предполагает движение по маршруту «место лесозаготовки – верхний склад» с грузом (деревьями, хлыстами или сортиментами) и «верхний склад – место лесозаготовки» без груза по заранее заданной траектории и скорости. Для этого используются информационно-управляющие системы как на участке лесозаготовки, так и на борту машины, которая может управляться дистанционно оператором или функционировать в автономном режиме [191].

Таким образом, задача заключается в поиске оптимального процесса перемещения трелевочной машины из начальной точки маршрута в конечную с учетом ограничений на фазовые координаты и время движения.

5.1. Закон автоматизированного движения трелевочной машины по заданной траектории

Данный закон представляет собой элемент системы управления поворотом БПТМ, обеспечивающий энергоэффективное и безопасное движение с пачкой

деревьев в полупогруженном положении по заданному пути волока без участия оператора.

Траектория движения БПТМ задана точками T_i , расположенными по центру волока. Машина должна последовательно перемещаться из точки T_0 в T_1 , затем в T_2 , T_3 и так далее (Рис. 5.1). Считается, что этап завершен, когда центр масс БПТМ C достигает очередной целевой точки. После этого система управления переключает направление движения к следующей точке.

Координаты всех точек заданы в виде $(x_i; y_i)$, а расстояние между ними ΔS_i вычисляется по формуле:

$$\Delta S_i = \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (x_i - x_{i-1})^2}, \quad (5.1)$$

Рассматриваемое движение по центру волока характерно для движения порожней БПТМ или БПТМ с сортиментами в полностью груженом состоянии.

Однако при трелевке пачки деревьев по участку волока, характеризуемым определенным радиусом поворота, необходимо исключать движение пачки вне волока, для этого необходимо, чтобы БПТМ двигалась по внешнему радиусу (R_4^n) поворота волока без выезда за его приделы, таким образом для БПТМ с пачкой деревьев необходимо осуществлять последовательное перемещение из точки T_1 , в точку T_2^n , далее в T_3^n , T_4^n и т. д. (Рис. 5.1).

В этом случае расстояние между точками ΔS_i для II, III и IV участков волока может быть найдено выражениям представленными ниже.

С целью исключения выезда конца пачки деревьев за пределы волока при подъезде БПТМ к повороту необходимо обеспечить выравнивание пачки вдоль продольной оси машины. Для этого на участке II осуществляется перемещение БПТМ с пачкой из центра (T_1) волока к краю (T_2^n) на величину k_n .

$$k_n = \frac{b}{2} - \frac{B_{\text{БПТМ}}}{2}, \quad (5.2)$$

где b – ширина волока ($b = B_{\text{БПТМ}} + 1,5 \cdot 2$), минимальная ширина волока составляет 5 м;

$B_{\text{БПТМ}}$ – ширина БПТМ.

$$\Delta S_2^n = \sqrt{(y_i - (y_{i-1} - k_n))^2 + (x_i - (x_i + k_n \cdot 2))^2}, \quad (5.3)$$

Электронный блок управления БПТМ непрерывно рассчитывает траекторию на основе приведенных уравнений при переходе от одной точки к следующей.

Координаты пути движения БПТМ можно фиксировать с помощью ГЛОНАСС/GPS-оборудования, записывая их в выбранной системе координат. Эта траектория будет использоваться в качестве эталонной при повторных проходах машины по трелевочному волоку. Движение по траектории должно осуществляться с минимальными отклонениями от нее и с высокой энергоэффективностью при этом определяется и фиксируется скоростной режим по пути с учетом ограничений по безопасности и кривизна пути.

На основе информации, получаемой от систем распознавания условий движения, в траекторию маршрута вносятся корректировки с целью повышения экологической безопасности при выполнении маневров на лесосеке, направленные на предотвращение выезда БПТМ за пределы волока.

5.2. Закон управления движением сочлененной колесной трелевочной машины по заданной траектории

Одним из распространенных методов автоматического управления является программный метод, при котором управляющие воздействия рассчитываются заранее и подаются в систему в зависимости от времени или другого параметра [158, 174].

Однако при управлении беспилотной трелевочной машиной (БПТМ) возникает дополнительное внешнее воздействие – помеха. Под помехой понимается совокупное влияние внешних факторов на контролируемые параметры БПТМ, такие как положение машины, расположение трелевочного оборудования с пачкой деревьев и т.д.

При движении БПТМ по сложному рельефу, например, на склоне, или при высокой нагрузке от волочения пачки деревьев может возникать пробуксовка колес, приводящая к отклонению от заданной траектории. Это воздействие имеет накопительный эффект, так как каждое последующее отклонение создает новые

начальные условия для системы управления, которая продолжает выдавать команды без учета накапливающихся ошибок. Для компенсации таких помех часто применяется метод управления по отклонению, когда текущее положение машины сравнивается с расчетной траекторией, а разница между ними (ошибка регулирования) передается в систему управления и далее в гидравлическое рулевое управление.

Хотя этот подход позволяет корректировать отклонения, он имеет существенные недостатки, включая запаздывание реакции, перерегулирование и колебания. Согласно принципам автоматического управления, эти проблемы можно частично устранить с помощью ПИД-регулятора, однако его ключевой минус заключается в том, что управляющий сигнал формируется только после возникновения ошибки. Альтернативой является управление по возмущению, при котором корректирующее воздействие генерируется одновременно с появлением помехи, что значительно снижает задержку реакции. Тем не менее, этот метод не получил широкого распространения из-за сложности разработки точных датчиков возмущений и того, что компенсируется только основное воздействие, тогда как дополнительные помехи продолжают влиять на систему.

Для БПТМ основной помехой выступает сила сопротивления при волочении деревьев, вызывающая отклонение от траектории. Оптимальным решением в данном случае является комбинированное управление, объединяющее принцип управления по возмущению (для компенсации главного воздействия) и управление по отклонению (для устранения остальных помех). В случае колесной сочлененной БПТМ (СБПТМ) предлагается использовать гибридный метод, сочетающий управление по отклонению с программным управлением, которое можно рассматривать как частный случай управления по возмущению (Рис. 5.2). Такой подход позволяет повысить точность и устойчивость системы управления, минимизируя влияние внешних факторов на движение машины.

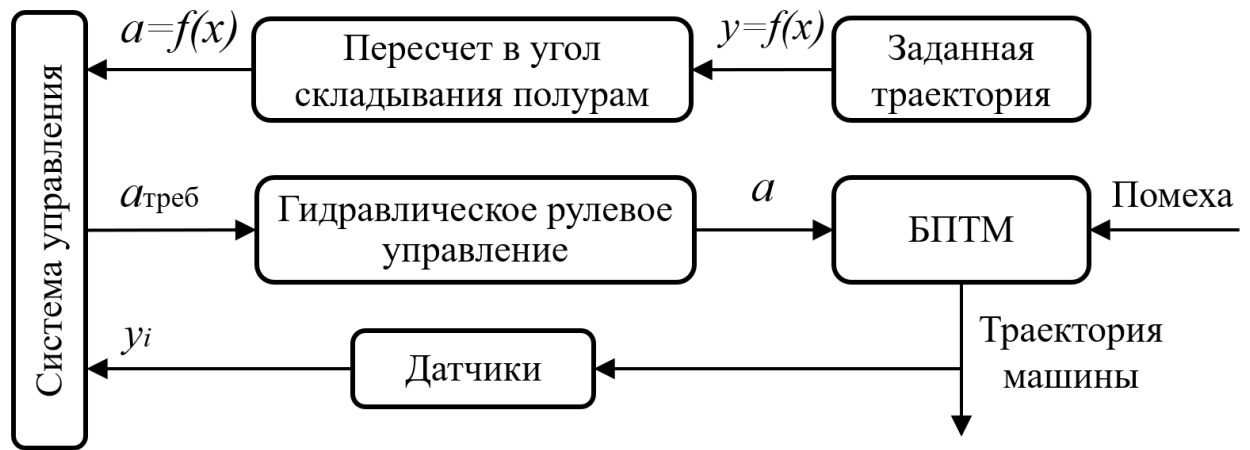


Рис. 5.2. Структурная схема системы управления движением колесной СБПТМ

Для эффективной реализации программного управления движением сочлененной беспилотной трелевочной машины необходимо выполнить преобразование запланированной траектории в функцию, описывающую изменение угла складывания полурам. Этот процесс основывается на анализе кинематической модели машины, представленной на Рис. 5.3.

Преобразование траектории в угловые параметры является ключевым этапом, так как позволяет перевести общие координаты движения в конкретные управляющие параметры для сочлененной конструкции машины.

Бортовая информационно-управляющая система (БИУС) определяет необходимый угол складывания полурам, анализируя траекторию и положение исполнительных механизмов рулевого управления колесной СБПТМ, чтобы обеспечить требуемую кривизну движения [21, 95, 122, 174].

Следующим этапом является выполнение обратного преобразования данных. Этот процесс базируется на ранее полученной математической модели, описывающей кинематику поворота машины. Обратное преобразование необходимо для того, чтобы перевести рассчитанные угловые параметры обратно в управляющие сигналы, которые сможет интерпретировать система управления машиной.

На Рис. 5.4 представлена структурная схема системы управления колесной СБПТМ в обозначениях MATLAB Simulink.

При проведении теоретических исследований колесной СБПТМ по выполнению маневров для каждой скорости уточнялись максимальные углы

складывания полурам, момент времени, соответствующий началу управляющего воздействия, а также время задержки сигнала управляющего воздействия, обусловленное характеристикой системы управления колесной СБПТМ.

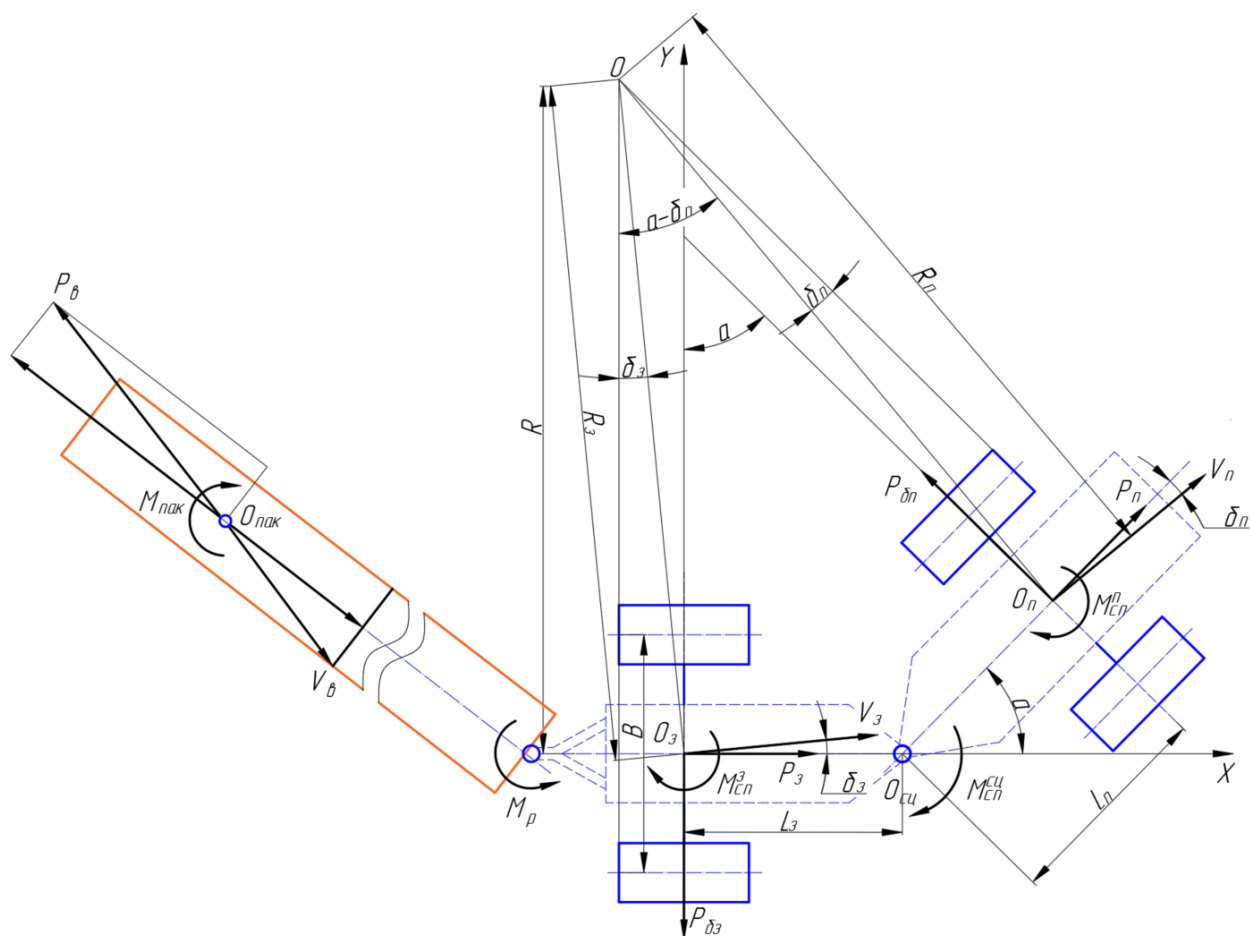


Рис. 5.3. Расчетная схема поворота колесной СБПТМ с пачкой деревьев

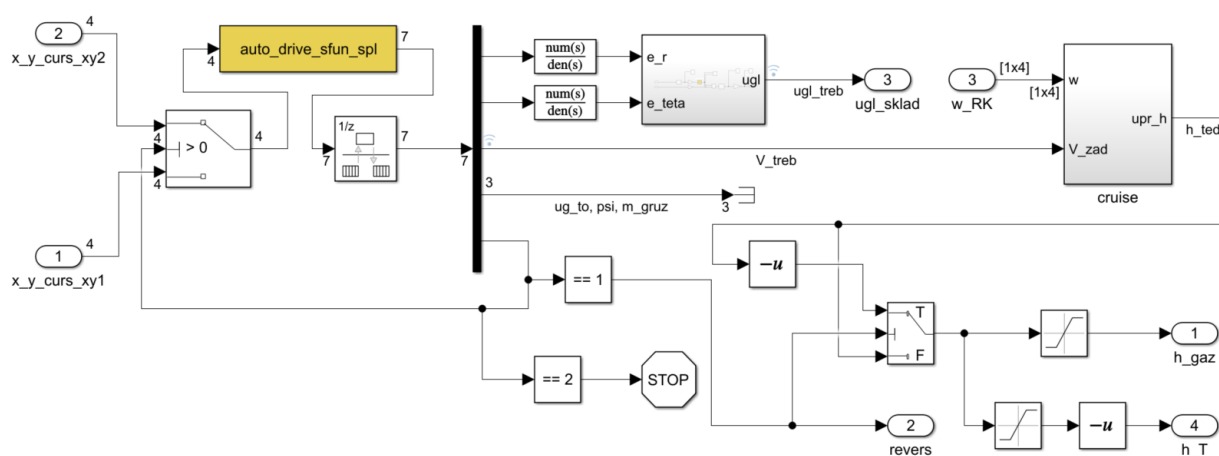


Рис. 5.4. Структурная схема системы управления колесной СБПТМ в обозначениях MATLAB Simulink

Закон управления складывания секций СБПТМ $\Theta(t)$ представлен на Рис. 5.5.

Оценочным параметром для данного маневра колесной СБПТМ с пачкой деревьев является предельно возможная скорость выполнения при заданной величине задержки управляющего воздействия.

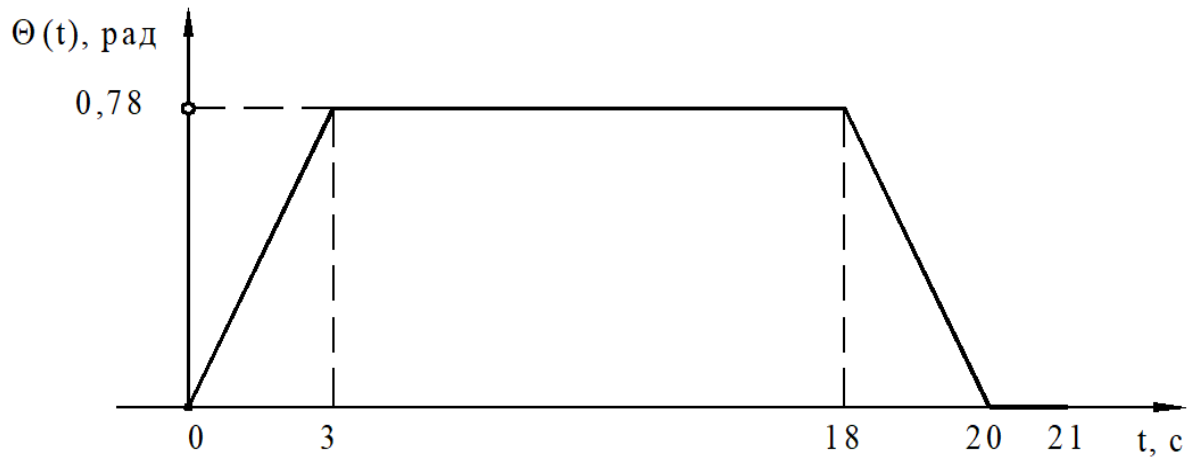


Рис. 5.5. Закон управления поворотом СБПТМ

Структурная схема математической модели подсистемы гидропривода складывания полурам колесной СБПТМ представлена на Рис. 5.6.



Рис. 5.6. Структурная схема гидропривода складывания полурам колесной СБПТМ

В предшествующих исследованиях динамика гидроэлементов достаточно хорошо изучена и описана.

Для детальной проработки закона управления поворотом СБПТМ используется схематическое представление (Рис. 5.8).

Угол поворота ψ определяется как угол складывания между передним и задним модулем СБПТМ. Направление движения γ определяется как направление движения переднего модуля СБПТМ. Ориентация α определяется как направление, в котором двигалась бы СБПТМ, если бы угол поворота был равен нулю и сохранялась исходная линия, как показана машина пунктирным отображением (Рис. 5.8). Значение α вычисляется как направление движения СБПТМ за вычетом половины угла поворота, т.е.

$$\alpha = \gamma - \frac{\psi}{2}, \quad (5.9)$$

Оба параметра, α и γ , задаются в глобальной системе координат.

При дистанционном движении по траектории ориентация и угол поворота фиксируются в каждой точке маршрута. Эти данные (α' и ψ') используются в методе «Следование по записи», который включает три независимых режима:

ψ_1 : Коррекция курса в соответствии с записанной ориентацией α' .

ψ_2 : Воспроизведение записанного угла поворота ψ' .

ψ_3 : Движение в направлении траектории.

Каждый режим зависит от текущих параметров: ориентации, угла поворота и расстояния до траектории. ψ_3 использует ближайшую точку маршрута (x' , y') и текущие координаты СБПТМ (x , y); ψ_1 учитывает разницу между записанной ориентацией α' и текущей μ ; ψ_2 применяет сохраненный угол поворота ψ' .

Эти три режима объединяются в итоговый управляющий сигнал ψ_t (Рис. 5.7).

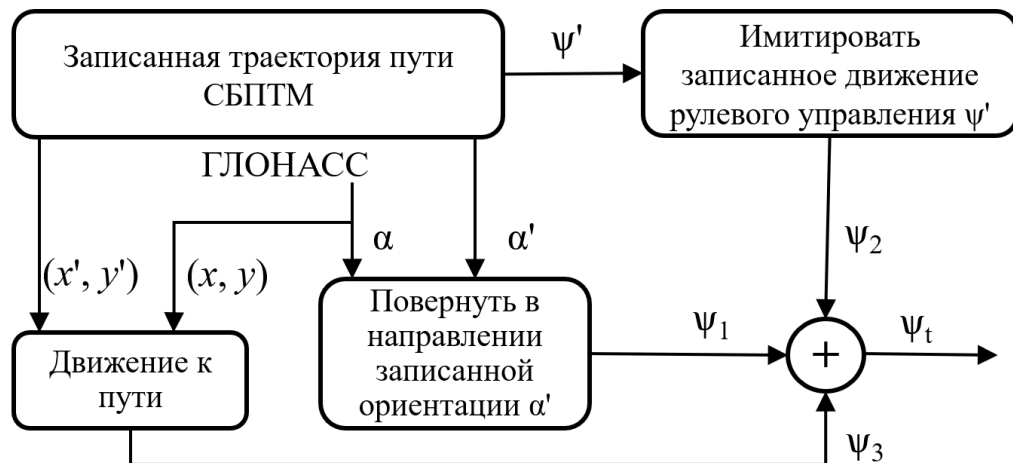


Рис. 5.7. Отслеживание траектории с активным управлением углом поворота ψ_t

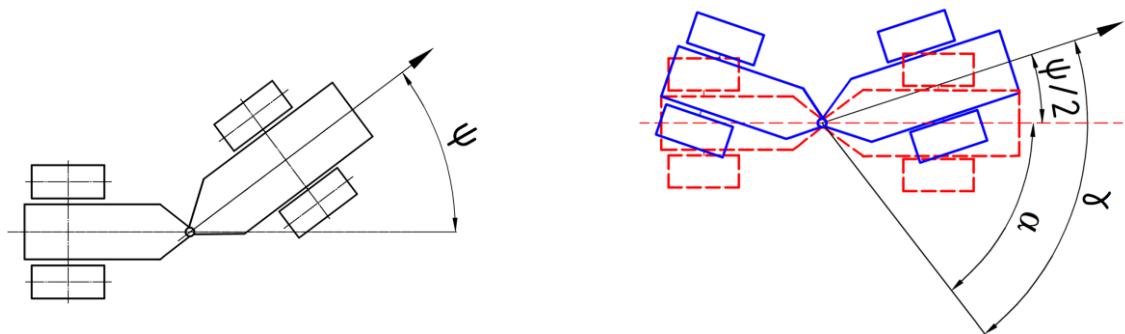


Рис.5.8. Схема определения угла поворота ψ , направления γ и ориентации α СБПТМ

ψ_1 : Коррекция курса по записанной ориентации. Управляющий сигнал вычисляется как разность между α' (ориентация в ближайшей точке траектории) и текущей α :

$$\psi_1 = \alpha' - \alpha, \quad (5.10)$$

ψ_2 : Воспроизведение записанного угла поворота. Позволяет точно повторять изгибы траектории:

$$\psi_2 = \psi', \quad (5.11)$$

ψ_3 : Возврат на траекторию. Необходим при отклонениях из-за помех или объезда препятствий. Реализуется двумя способами:

Способ 1: Самым простым способом является вычисление значения, которое прямо пропорционально расстоянию между СБПТМ и точкой пути. Делается это путем умножения расстояния d на постоянную величину k :

$$\psi_3 = k \cdot d, \quad (5.12)$$

где d – обозначенное знаками расстояние между СБПТМ и точкой траектории.

Расстояние d может быть отрицательным или положительным, в зависимости от стороны траектории движения СБПТМ. Типичное значение $k=0,07$. Чтобы избежать чрезмерных углов, ψ_3 ограничивается диапазоном $\pm 90^\circ$.

Способ 2: При использовании способа 1 расчет управляющего угла ψ_3 является линейным. Это может привести к колебаниям траектории движения, когда СБПТМ находится близко к ней. Уменьшение значения параметра k приводит к замедлению реакции даже при большом значении параметра d , а это означает, что СБПТМ требуется больше времени, чтобы добраться до маршрута. Способ 2 позволяет устранить эту проблему, используя прогнозируемую точку и вычисляя угол между СБПТМ и прогнозируемой точкой (Рис. 5.9).

Алгоритм вычисления ψ_3 с помощью способа 2 следующий:

1. Найти ближайшую точку траектории.
2. Определить прогнозируемую точку на расстоянии l в направлении $\beta = \alpha' + \psi'$.
3. Вычислить угол ξ между текущим положением СБПТМ и прогнозируемой точкой.

4. Вычислить ψ_3 как разницу между ξ и углом β , т.е. $\psi_3 = \xi - \beta$.

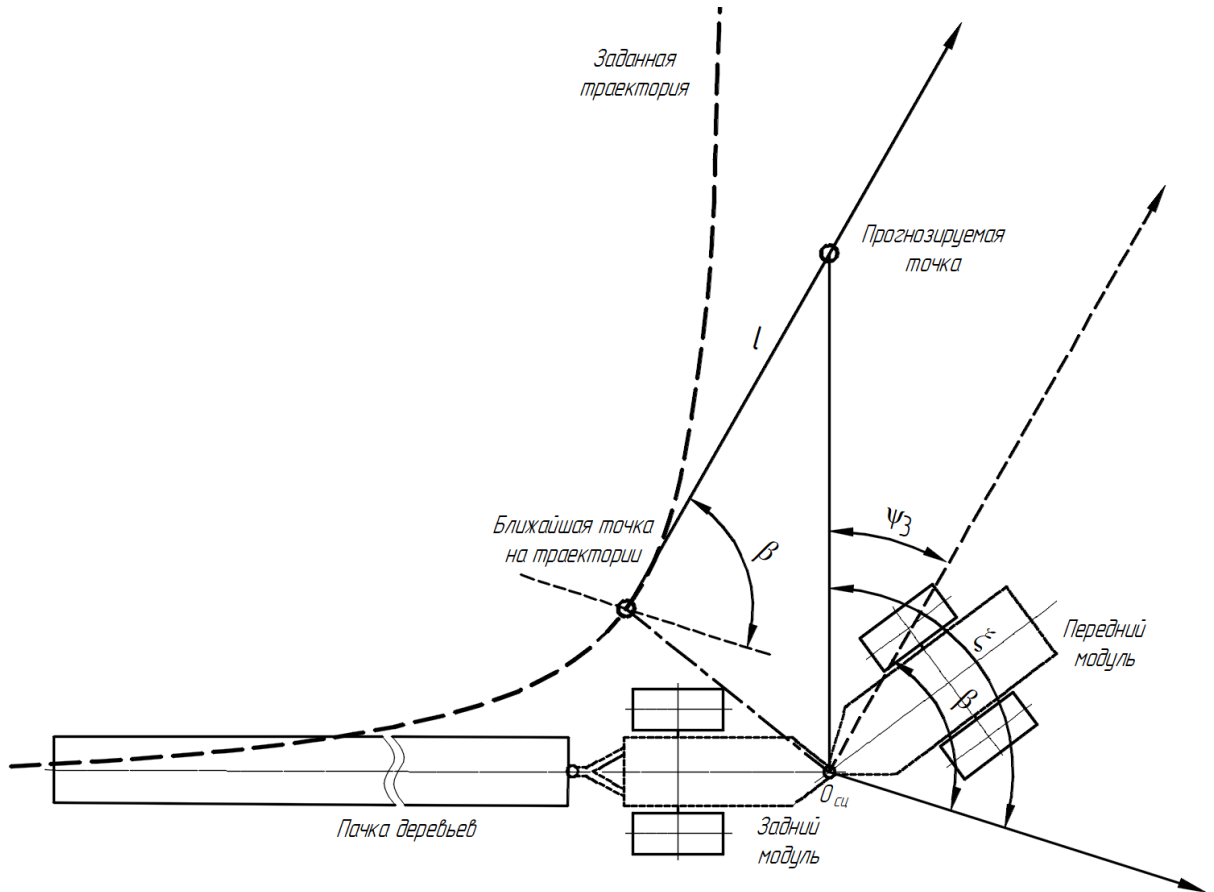


Рис. 5.9. Вычисление ψ_3 в способе 2

Формирование итогового управляющего сигнала.

Резльтирующий угол ψ_t - сумма трех составляющих (Рис. 5.7):

$$\psi_t = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3, \quad (5.13)$$

Для способа 1 это выражение имеет вид:

$$\psi_t = \alpha' - \alpha + \psi' + k \cdot d, \quad (5.14)$$

Для способа 2 выражение для объединенного ψ_t имеет вид:

$$\psi_t = \xi - \beta + \psi_1 + \psi_2 = \xi - (\alpha' + \psi') + (\alpha' - \alpha) + \psi' = \xi - \alpha, \quad (5.15)$$

5.3. Закон управления движением гусеничной трелевочной машины по заданной траектории

При выполнении поворота БПТМ с пачкой деревьев возникают реакции связей, вызванные воздействием пачки [72, 87, 139]. Характер поворота зависит от соотношения между радиусом поворота R и приведенной длиной пачки $L_{\text{п}}$,

которая определяется как расстояние между центрами давления пачки на трелевочное оборудование (O_c) и на ОП (O_6). В зависимости от этих параметров возможны два режима поворота.

Как показано на Рис. 5.10, если $R \geq L_{\pi}$, поворот осуществляется в первой фазе с радиусом:

$$R_1 = \frac{L_{\pi} \cos \gamma}{\sin(\psi - \gamma)}, \quad (5.16)$$

где γ - угол между продольной осью машины и направлением линейной скорости точки сцепки O_c ;

ψ - угол между продольной осью БПТМ и пачкой деревьев.

Анализ формулы (5.16) показывает, что радиус поворота уменьшается при сокращении L_{π} и увеличении ψ . Если угол ψ достигает 90° , минимальный радиус R_1 становится равным L_{π} .

В некоторых конструкциях трелевочного оборудования угол ψ ограничен значением ψ_{np} , при котором происходит зажим деревьев в погрузочном устройстве [123, 136]. В этом случае (вторая фаза поворота) вектор скорости точки O_6 направлен под углом δ к оси пачки, а мгновенный центр вращения O_a смещен относительно O_6 на величину m , учитывающую также небольшой поперечный изгиб пачки. Радиус поворота во второй фазе определяется выражением (5.17):

$$R_2 = L_{\pi} \cdot \frac{\cos \delta \cdot \cos \gamma}{\sin(\psi + \delta - \gamma)}, \quad (5.17)$$

а теоретический радиус вычисляется по формуле (5.18):

$$R_t = \frac{B \cdot L_{\pi} \cos \delta \cdot \cos \gamma}{\sin(\psi + \delta - \gamma)} \cdot \frac{1}{B + d_2 - d_1} + \frac{B(d_2 + d_1)}{2(B + d_2 - d_1)}, \quad (5.18)$$

где B – ширина колеи машины;

d_1 и d_2 – поперечные смещения мгновенных центров вращения гусениц (отстающей и забегающей).

Для управления движением гусеничной БПТМ по заданной траектории разработан закон. Данная система непрерывно отслеживает два ключевых параметра отклонения:

1) Линейное отклонение (e_r) - расстояние от текущего положения до заданной траектории. 2) Угловое отклонение (e_θ) - разница между текущим и расчетным курсом движения.

Двойной контроль отклонений позволяет системе более точно корректировать движение машины, учитывая как положение, так и ориентацию относительно траектории.

В основе алгоритма лежит расчетная схема (Рис. 5.10), которая наглядно демонстрирует: траекторные характеристики движения БПТМ; особенности поворота машины с грузом (пачкой деревьев); ключевые контрольные точки для определения отклонений.

Наличие груза существенно влияет на динамику машины, поэтому схема учитывает этот важный фактор.

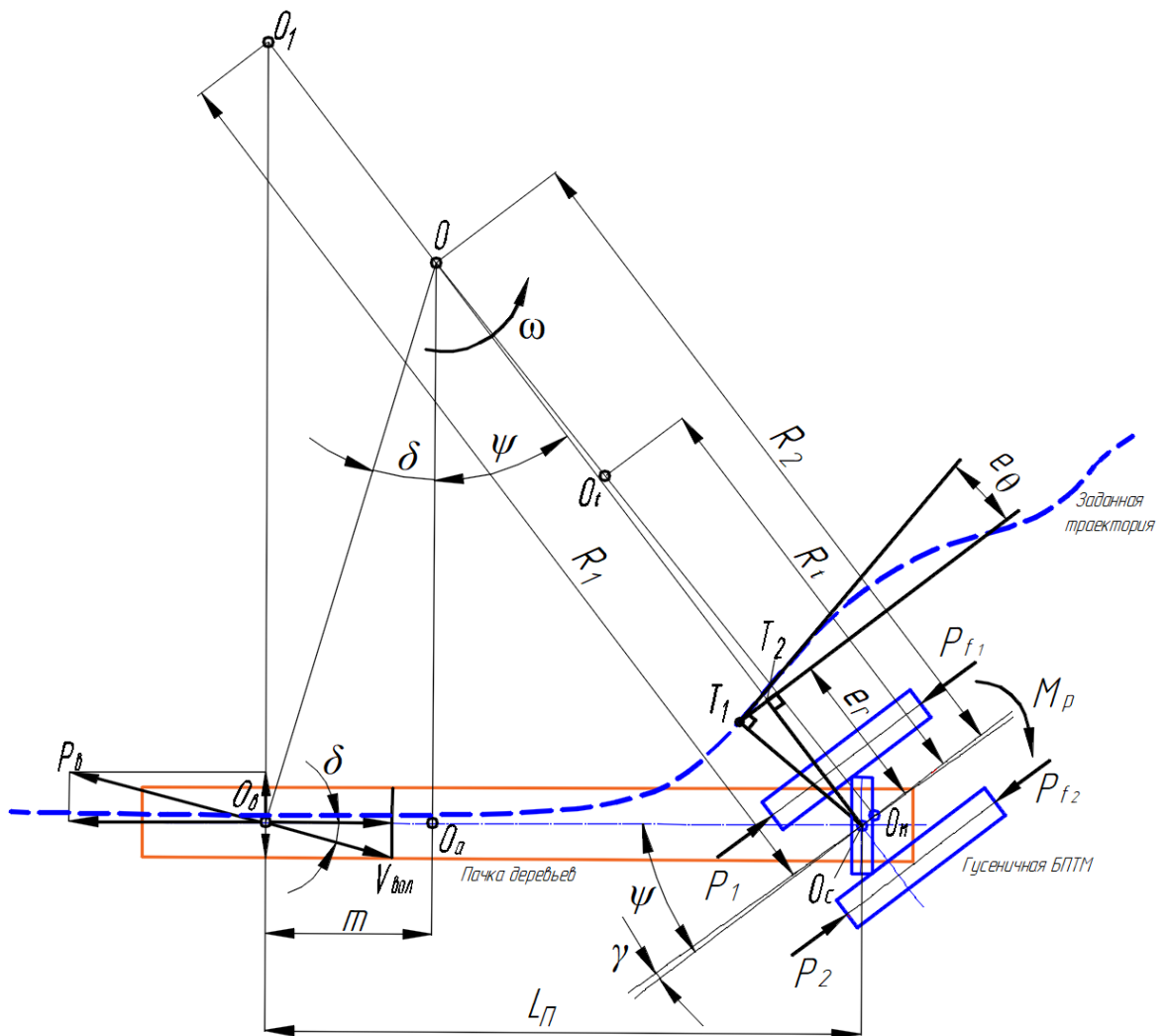


Рис. 5.10. Расчетная схема движения и поворота гусеничной БПТМ с пачкой деревьев

Для точного определения отклонений в алгоритме используются три основные точки:

1) Точка O_c - базовый центр отсчета, относительно которого измеряются параметры e_r и e_θ .

Точка T_1 - находится на пересечении:

- заданной траектории движения;
- перпендикуляра, проведенного от точки O_c к оси БПТМ.

Точка T_2 - расположена на касательной к траектории в точке T_1 и служит для:

- уточнения величины отклонения;
- корректировки угловых параметров движения.

Точка O_c расположена на оси поворота захвата трелевочного оборудования.

Использование системы из трех контрольных точек позволяет добиться высокой точности позиционирования, что особенно важно при трелевке пачки в сложных условиях.

Для коррекции траектории движения гусеничной БПТМ сначала компенсируется линейное отклонение, затем угловое. Алгоритм включает комбинированный регулятор, состоящий из: ПИД-регулятора (PID_r), устраняющего линейное отклонение; регулятора углового отклонения (PID_θ), воздействие которого уменьшается (путем умножения на коэффициент <1) при активной работе PID_r . После суммирования управляющих сигналов выполняется их нормирование.

Данный регулятор позволяет обеспечить движение БПТМ с пачкой деревьев по заданной траектории в соответствии с разработанным законом управления. Структурная схема системы управления представлена на Рис. 5.11.

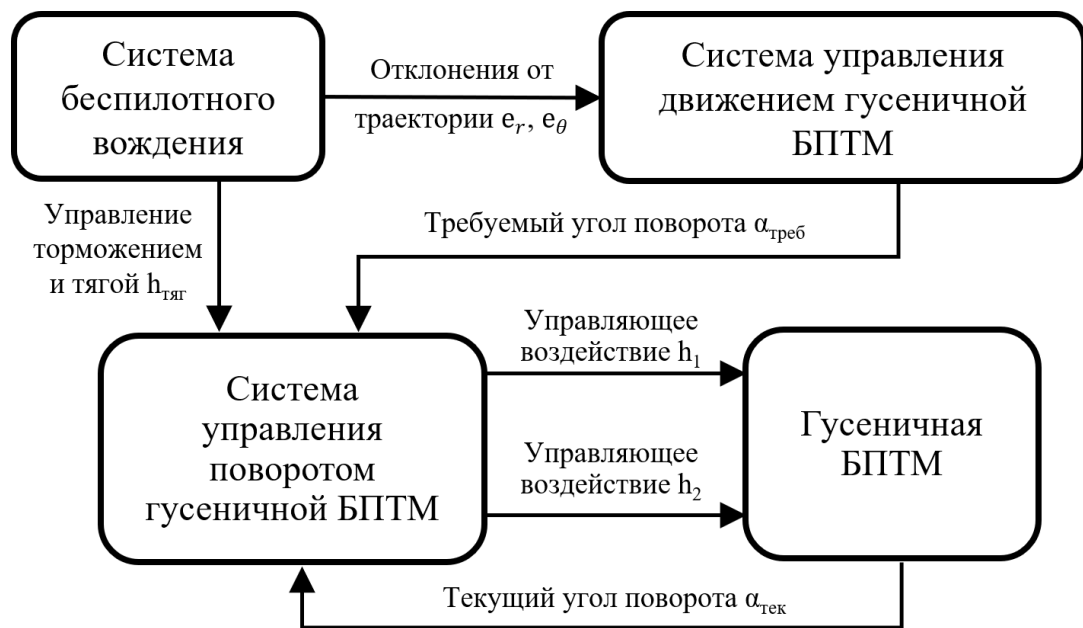


Рис. 5.11. Структурная схема системы управления движением гусеничной БПТМ

Применение разработанных законов позволяет: автоматизировать движение машины без участия оператора; повысить точность следования по траектории при трелевке; улучшить маневренность, предотвращая съезд с волока; увеличить безопасность и энергоэффективность операций. Это упрощает дистанционное управление и снижает нагрузку на оператора.

5.4. Выводы по Главе 5

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.

Использование разработанных законов управления движением БПТМ обеспечит автономное перемещение машины либо движение по заранее

заданному маршруту при трелевке сортиментов или пачки деревьев в полупогруженном состоянии, с учетом особенности трелевочного оборудования и конструктивного исполнения БПТМ. Это позволит упростить дистанционное управление оператором, повысить точность выполнения поворотов без выезда за пределы трелевочного волока, а также увеличить безопасность и энергетическую эффективность при проведении трелевочных операций.

Глава 6. Теоретические исследования процесса трелевки колесными и гусеничными беспилотными машинами

6.1. Программа виртуальных испытаний для комплексного определения рациональных конструктивных параметров беспилотных колесных и гусеничных машин в процессе трелевки

Для комплексного определения рациональных конструктивных параметров была сформирована файловая база данных типовых условий эксплуатации лесозаготовительных машин, содержащая параметризованные характеристики дорожно-грунтовых условий (ДГУ), которая выполнена в виде виртуальной лесосеки (Глава 4).

С использованием разработанных законов управления движением сформируем программу виртуальных испытаний для комплексного определения рациональных конструктивных параметров БПТМ в процессе трелевки [100, 131]. Программу виртуальных испытаний можно разбить на два основных направления:

1. Теоретический анализ показателей подвижности при трелевке БПТМ с применением компьютерного моделирования, направленный на изучение профильной проходимости при преодолении различных препятствий;
2. Исследование динамики движения колесных и гусеничных БПТМ в условиях трелевки по маршрутам волока на виртуальной лесосеке, включая особенности маневрирования.

6.2. Определение показателей профильной проходимости беспилотных трелевочных машин

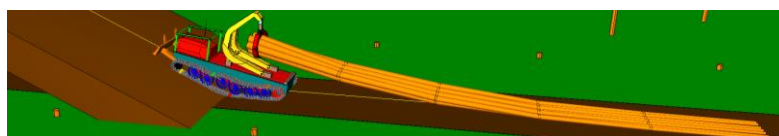
Определение показателей профильной проходимости БПТМ осуществлялось на специально разработанных участках модели виртуальной лесосеки, рассмотренных в Главе 4. В ходе виртуальных испытаний определялись

следующие показатели: углы преодолеваемого подъема, спуска и косогора, максимальная и установленная требованиями высота преодолеваемых единичных неровностей (поваленное дерево, пень), максимальная высота преодолеваемого вертикального уступа, максимальная высота преодолеваемого контрэскарпа.

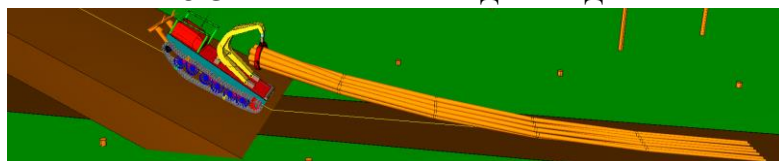
6.2.1. Моделирование движения гусеничной беспилотной трелевочной машины при преодолении подъемов и спусков

Исследовалось движение гусеничной БПТМ, оборудованной пачковым захватом, а также машины с самозажимным коником и манипулятором, при преодолении подъемов и спусков с углом наклона 25° . Скорость движения машин составляла 7,2 км/ч. В процессе компьютерного моделирования были определены вертикальные реакции, воздействующие на опорные катки гусеничной машины. Важным условием являлось то, что эти нагрузки не должны были превышать предельно допустимое значение, равное 10-кратной статической нагрузке на один каток. Это требование связано с обеспечением прочности ходовой части и устойчивости машины при движении.

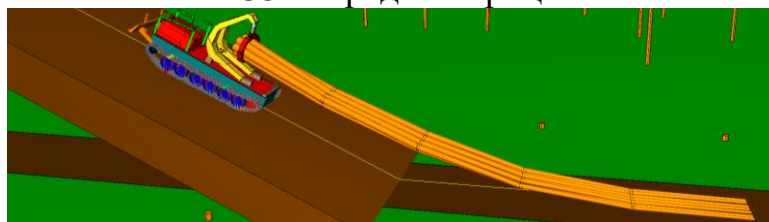
На Рис. 6.1 представлены ключевые фазы перемещения гусеничной БПТМ, оснащенной пачковым захватом, во время преодоления подъема с углом 25° . Изображены следующие моменты времени:



$T = 6 \text{ с}$ – начальная стадия подъема



$T = 8 \text{ с}$ – середина процесса



$T = 12 \text{ с}$ – завершающий этап преодоления подъема

Рис. 6.1. Последовательность положений гусеничной БПТМ с пачковым захватом при движении на подъеме 25°

На Рис. 6.2 отображены изменения вертикальных реакций, возникающих под опорными катками в процессе движения машины по склону 25° со скоростью 7,2 км/ч. Результаты моделирования показали, что все нагрузки остаются в пределах допустимых значений, не превышая 10-кратной статической нагрузки на каток.

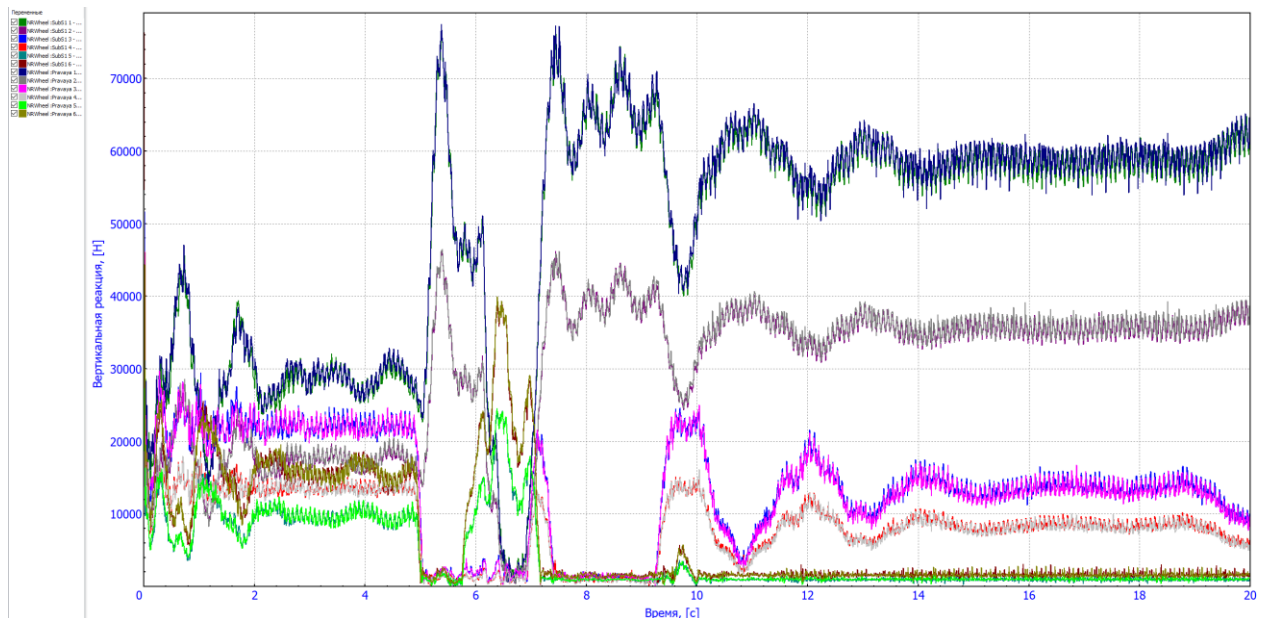


Рис. 6.2. Изменение вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ при движении на подъеме 25°

Рис. 6.3 демонстрирует ситуацию, при которой гусеничная БПТМ теряет подвижность при попытке преодолеть более крутой подъем — 30° . В этот момент происходит отрыв от опорной поверхности двух передних кареток (как по левому, так и по правому борту). Данное моделирование подтвердило, что максимальный угол подъема, который способна преодолеть данная машина, составляет 25° .

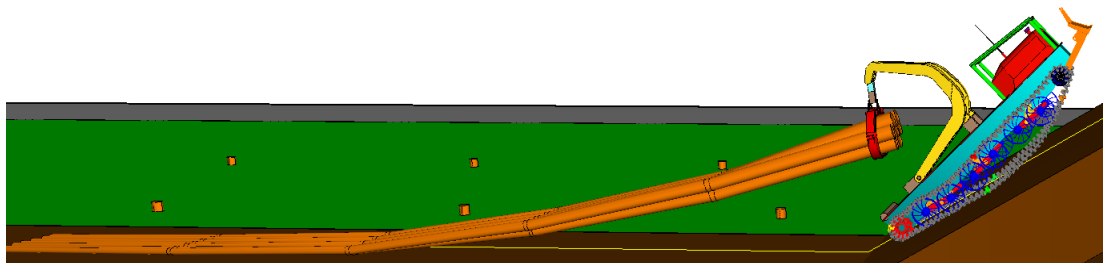


Рис. 6.3 Потеря подвижности гусеничной БПТМ при попытке движения на подъеме 30° (отрыв передних кареток)

На Рис. 6.4 представлены результаты моделирования, отображающие распределение вертикальных нагрузок на опорные элементы гусеничной беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом в аварийной ситуации. График фиксирует момент потери устойчивости при попытке преодоления 30-градусного подъёма, когда происходит одновременный отрыв передних кареток обоих бортов транспортного средства.

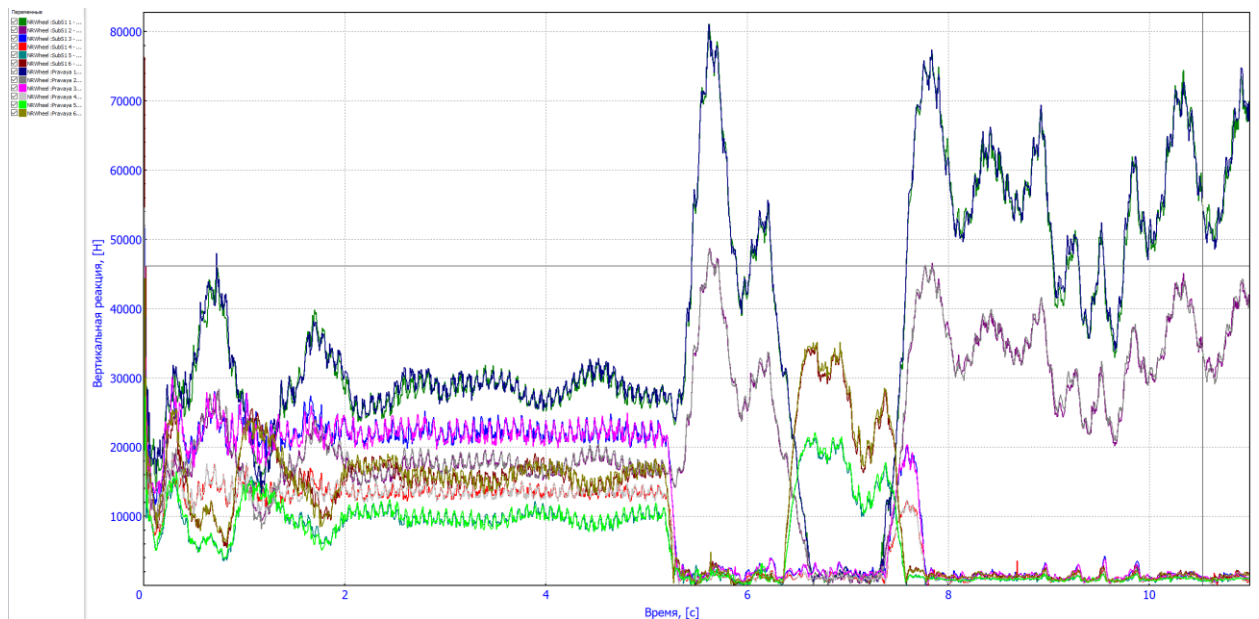


Рис. 6.4. Распределение вертикальных нагрузок на катки БПТМ с пачковым захватом в момент потери устойчивости на 30° склоне (отрыв передних кареток)

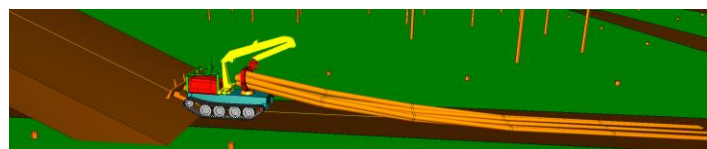
Исследование включает сравнительную оценку двух конструктивных решений: машины с пачковым захватом и модификации с самозажимным коником и манипулятором.

Рис. 6.5 демонстрирует фазы движения четырехкатковой гусеничной БПТМ, оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской, во время преодоления подъема с углом наклона 25°.

На Рис. 6.6 показаны результаты моделирования второй модификации при движении по 25-градусному подъёму. Важно отметить, что во всех случаях эксплуатационные нагрузки не превышали установленного предела - десятикратного значения статической нагрузки на отдельный опорный каток.

Отдельное внимание уделено анализу работы машин на спусках. На Рис. 6.7 поэтапно показано перемещение БПТМ с пачковым захватом по 25-

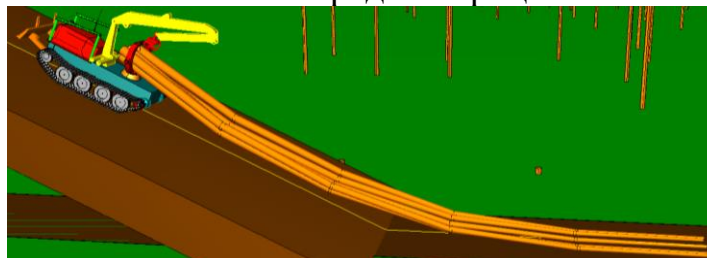
градусному склону включая переход с наклонного участка на горизонтальную поверхность. Обе машины успешно преодолевают заданный угол спуска, аналогично, как и на подъеме. Фазы движения БПТМ с пачковым захватом показаны на Рис. 6.7, а вариант с самозажимным коником - на Рис. 6.10.



$T = 7 \text{ с}$ – начальная стадия подъема



$T = 12 \text{ с}$ – середина процесса



$T = 15 \text{ с}$ – завершающий этап преодоления подъема

Рис. 6.5. Фазы перемещения гусеничной БПТМ с самозажимным коником и манипулятором при движении по склону 25°

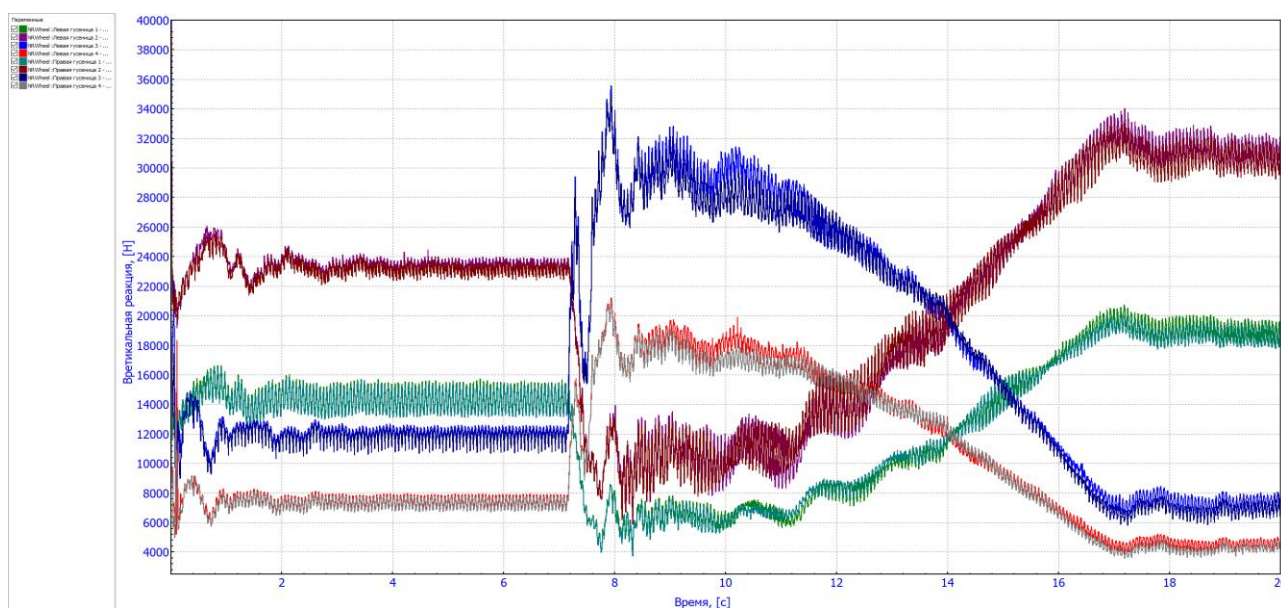


Рис. 6.6. Динамика вертикальных нагрузок на катки БПТМ с самозажимным коником при преодолении 25° подъёма (7,2 км/ч)

Соответствующие нагрузочные характеристики представлены на Рис. 6.8, где подтверждается соблюдение всех нормативных требований по предельно допустимым нагрузкам.

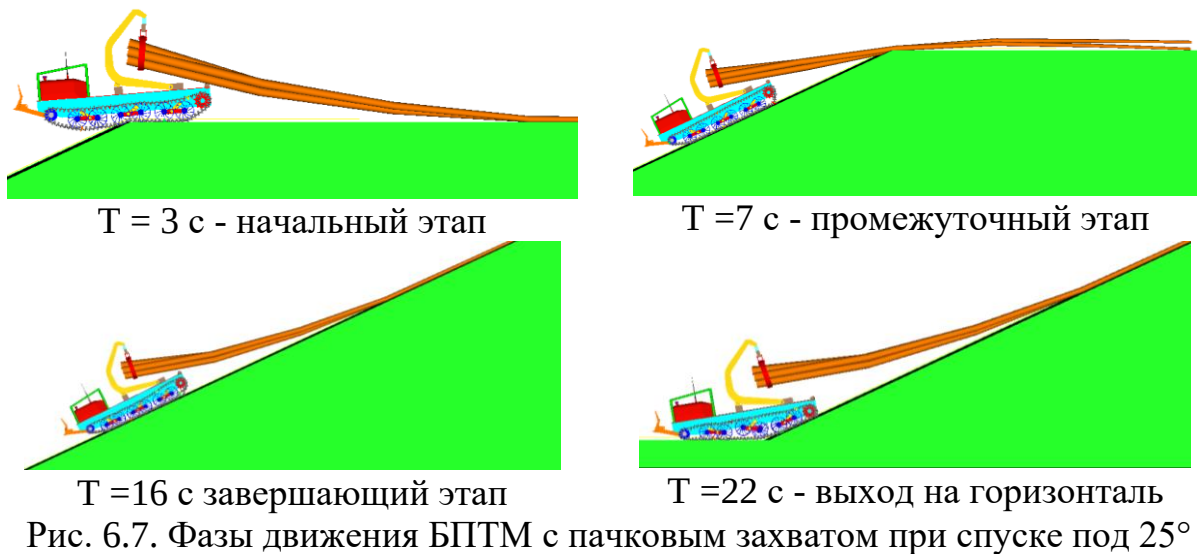


Рис. 6.7. Фазы движения БПТМ с пачковым захватом при спуске под 25°

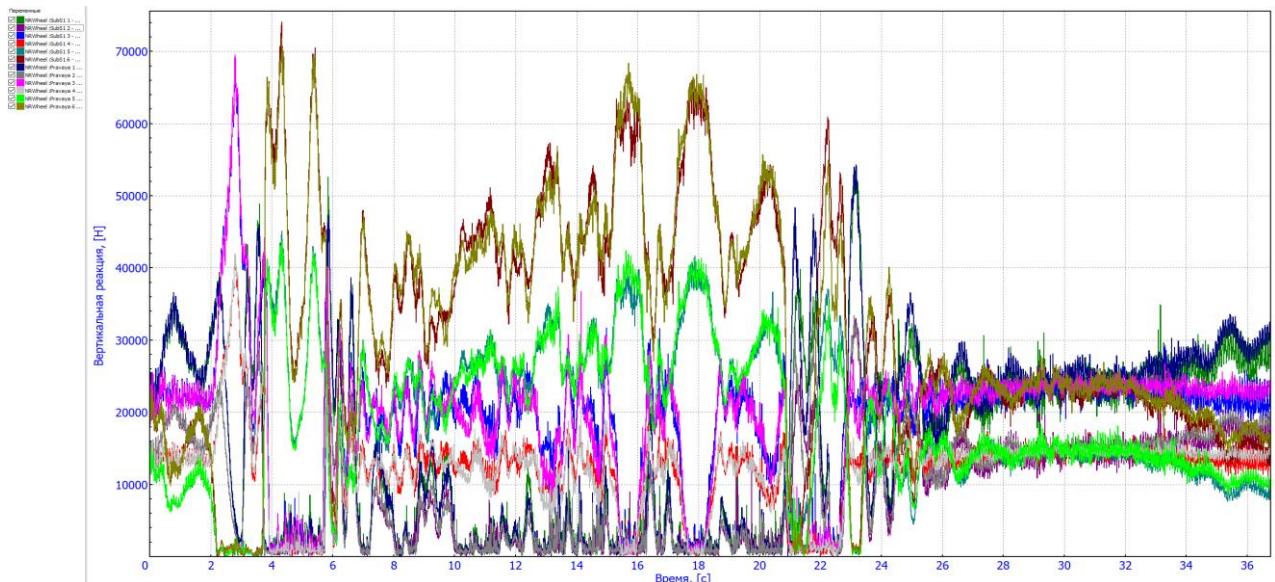
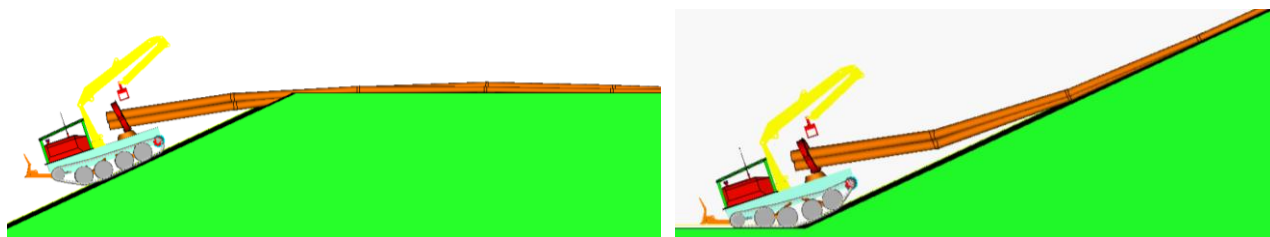


Рис. 6.8. Изменение вертикальных реакций под катками БПТМ при спуске 25° (7,2 км/ч)

На Рис. 6.9 зафиксирована позиция гусеничной БПТМ, оборудованной пачковым захватом, в момент потери подвижности при спуске под углом 30° . Это позволяет сделать вывод, что предельно допустимый угол спуска для данной модели не превышает 25 градусов.



Рис. 6.9. Этапы перемещения гусеничной БПТМ с пачковым захватом при потере подвижности на 30-градусном спуске (контакт пачки хлыстов с корпусом машины)



Т = 7 с - промежуточный этап
Т = 22 с - выход на горизонталь
Рис. 6.10 Фазы движения гусеничной БПТМ, оснащенной самозажимным коником и манипулятором, при преодолении 25-градусного спуска

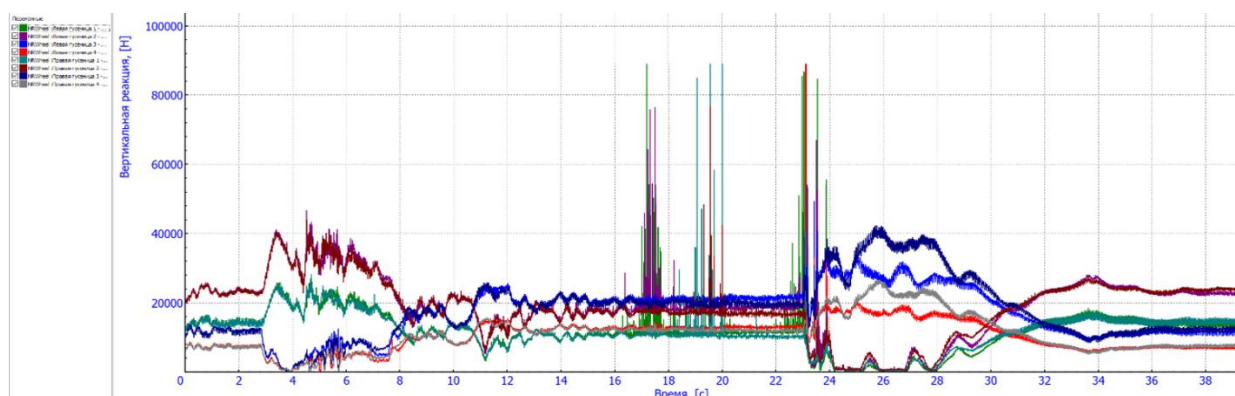


Рис. 6.11. Характер распределения вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ с самозажимным коником и манипулятором при спуске под углом 25° (скорость движения 7,2 км/ч)

Проведённые исследования демонстрируют, что при движении по 25-градусным склонам (как на подъём, так и на спуск) все модели гусеничных машин сохраняют устойчивость, а возникающие нагрузки остаются в пределах установленного десятикратного норматива статической нагрузки на опорный каток.

6.2.2. Моделирование движения гусеничной беспилотной трелевочной машины по косогору

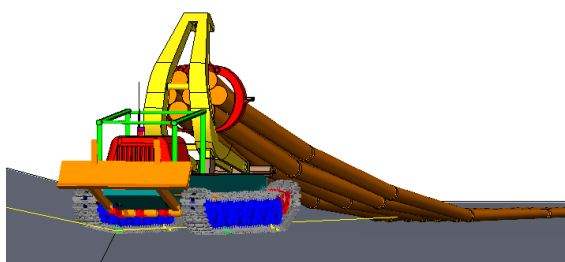
В ходе исследования проводилось компьютерное моделирование движения двух модификаций гусеничных БПТМ (с пачковым захватом и с самозажимным коником, оснащенный манипулятором) при преодолении косым курсом косогора с 15-градусным уклоном [27].

Имитационные испытания проводились при следующих параметрах:

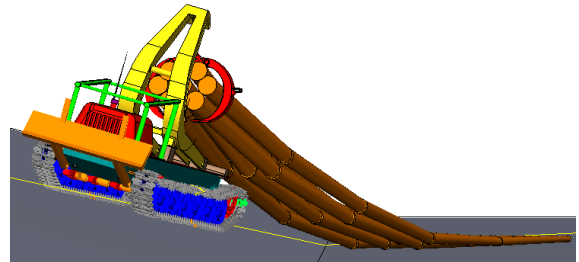
- угол наклона поверхности: 15° (косогор);
- скорость движения: 7,2 км/ч (постоянная).

Критерий оценки: величина вертикальных нагрузок на опорных катках.

Для обеих модификаций техники было установлено важное условие: возникающие в процессе движения вертикальные нагрузки на катки не должны превышать предельно допустимое значение, составляющее 10 статических нагрузок на один опорный элемент. Это требование обусловлено необходимостью обеспечения надежности ходовой системы. Рис. 6.12 иллюстрирует фазы движения БПТМ с пачковым захватом при преодолении 15-градусного косогора.



$T = 7$ с – начальный этап



$T = 17$ с – фаза преодоления

Рис. 6.12. Фазы движения БПТМ с пачковым захватом при преодолении 15-градусного косогора

Анализ графических данных (Рис. 6.13) демонстрирует, что при движении по косогору:

- все возникающие нагрузки остаются в установленных пределах;
- критические превышения отсутствуют.

Аналогичные исследования для модели с самозажимным коником представлены на Рис. 6.14 и 6.15.

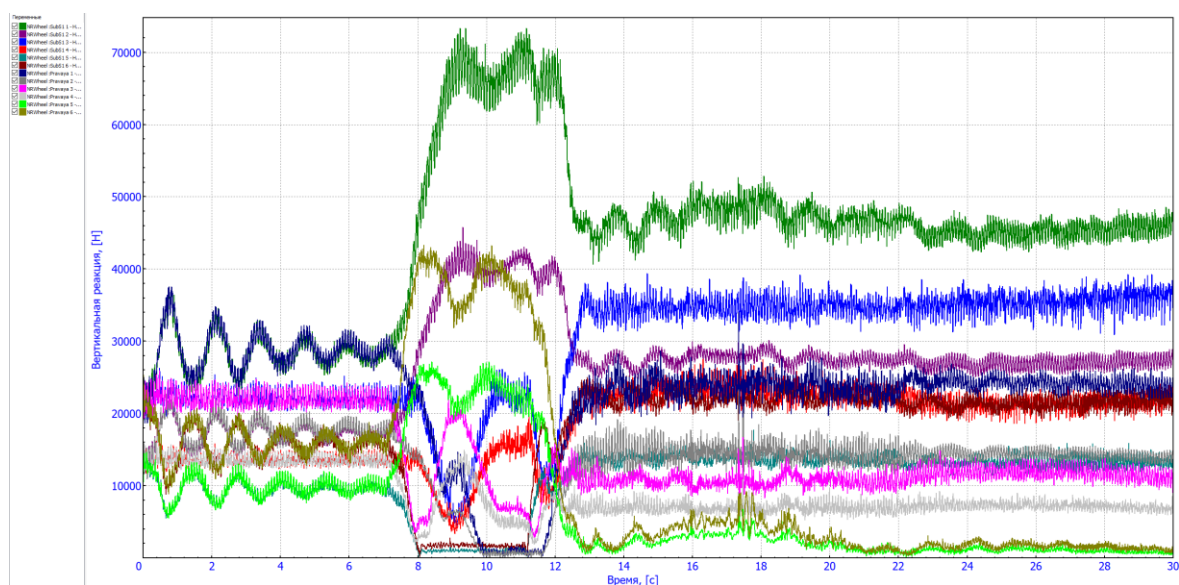
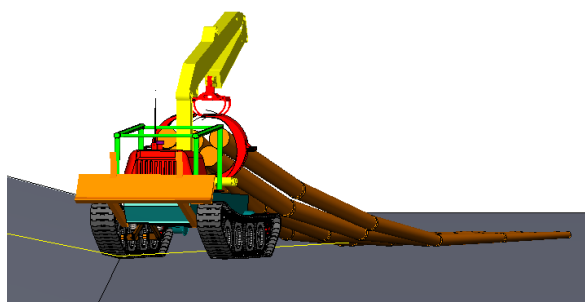
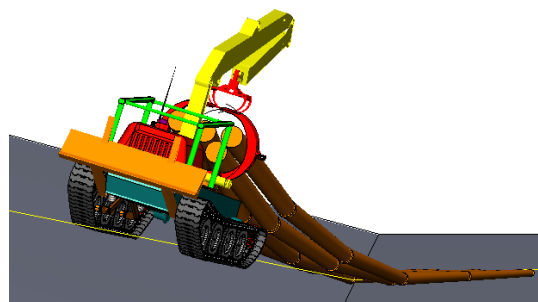


Рис. 6.13. Изменение вертикальных нагрузок на опорные катки БПТМ с пачковым захватом при движении по 15-градусному косогору (7,2 км/ч)



Т = 6 с – начальный этап



Т = 16 с – фаза преодоления

Рис. 6.14. Фазы движения БПТМ с самозажимным коником и манипулятором при преодолении 15-градусного косогора

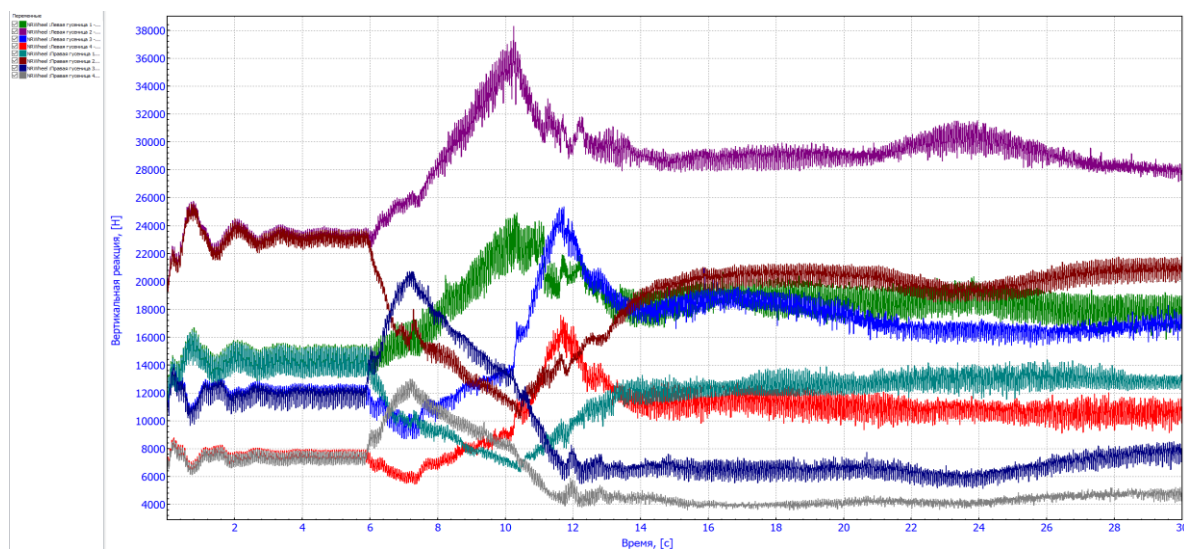


Рис. 6.15. Динамика вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником и манипулятором при преодолении косогора (скорость 7,2 км/ч)

Результаты исследования показали, что обе модификации успешно преодолевают заданный 15-градусный косогор без потери подвижности. Однако сравнительный анализ выявил существенное различие в нагрузочных характеристиках: максимальные значения вертикальных реакций для модели с пачковым захватом оказались на 23% выше, чем у варианта с самозажимным коником. При этом все зафиксированные показатели соответствуют техническим требованиям и не превышают установленных предельных значений.

6.2.3. Оценка предельной высоты преодолеваемого единичного препятствия в виде поваленного дерева

Для установления предельной высоты преодолемого одиночного препятствия, имитирующего лежащее дерево, применялся специально смоделированный участок лесного массива. На данном участке последовательно располагались искусственные препятствия, первоначальные габариты которых составляли 0,1 м в высоту и 0,1 м в ширину. Каждое последующее препятствие увеличивалось по обоим параметрам на 0,1 м с шагом 8 метров, достигая максимальных размеров 0,7×0,7 м.

На Рис. 6.16 а представлены фрагменты переезда через единичные препятствия в виде поваленного дерева гусеничной шестикатковой БПТМ оснащенной пачковым захватом и упруго-рычажно-балансирной подвеской. Для всех исследований, проводимых с разными моделями БПТМ фиксировались силы реакций, действующие в шарнирах рассматриваемых вариантов технологического оборудования (пачковый захват, самозажимной коник) на Рис. 6.16 б представлен один из примеров реализации. Оценка сил в последующем позволит выявить рациональные параметры технологического оборудования БПТМ.

Виртуальные эксперименты проводились при равномерном движении гусеничных БПТМ со скоростью 3,6 км/ч. Критерием определения предельной высоты преодолемого поваленного дерева служила высота последней успешно пройденной неровности, после которой следовало препятствие, вызывающее потерю подвижности. Потеря подвижности возникала вследствие двух основных факторов: превышения допустимых геометрических параметров машины и недостаточного сцепления гусениц с поверхностью.

На Рис. 6.17. представлен график изменения вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ оснащенной пачковым захватом и упруго-рычажно-балансирной подвеской при преодолении единичных препятствий в виде поваленного дерева характеризуемых высотой и шириной от 0,1 x 0,1 м, с возрастанием высоты и ширины каждого последующего единичного препятствия на 0,1 м с интервалами 8 м до препятствия 0,7 x 0,7 м.

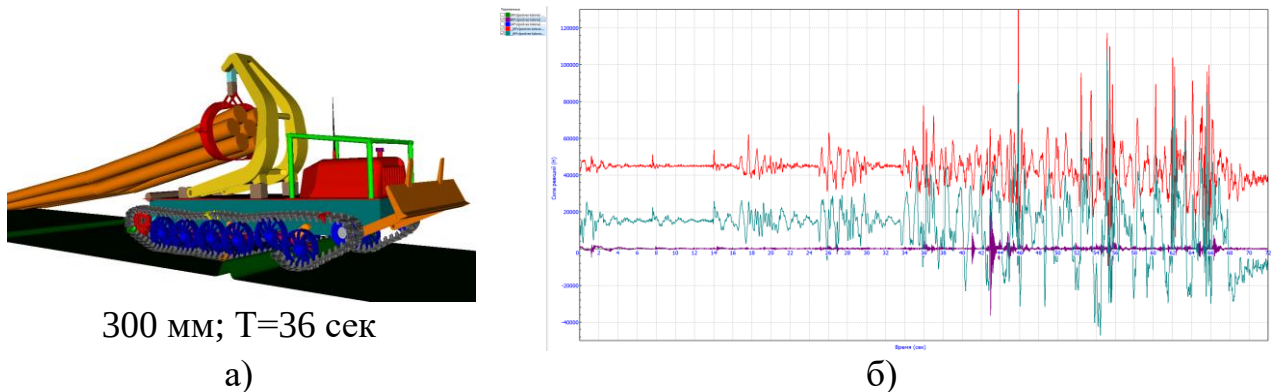


Рис. 6.16. Гусеничная БПТМ оснащенная пачковым захватом и упруго-рычажно-балансирной подвеской: а) фрагмент преодоления единичных препятствий в виде поваленного дерева; б) сила реакций в шарнире пачкового захвата

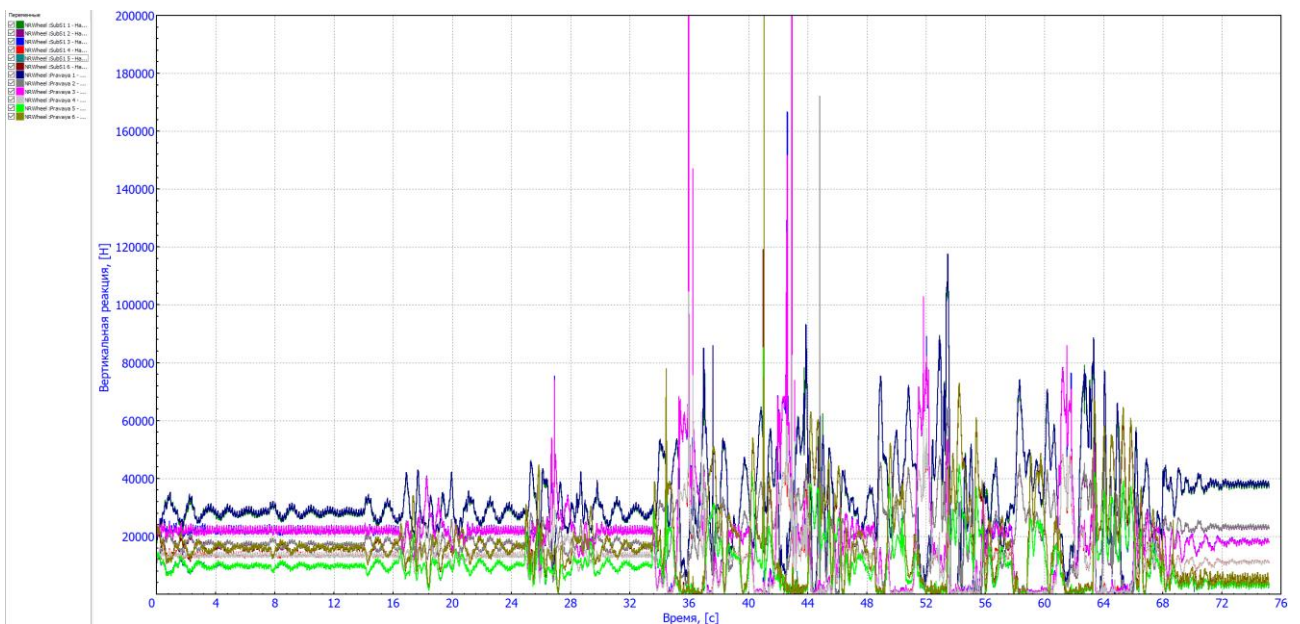
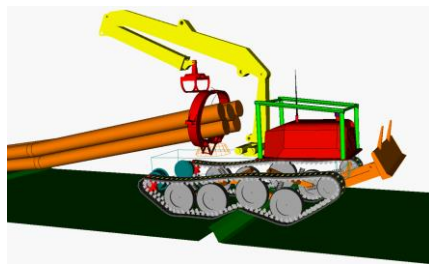


Рис. 6.17. Изменение вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ с пачковым захватом при преодолении единичных препятствий в виде поваленного дерева высотой 0,1 – 0,6 м с интервалами 8 м (0,7 м не преодолела)

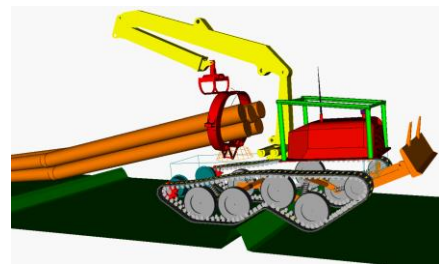
Аналогичная оценка предельной высоты преодолеваемого единичного препятствия в виде поваленного дерева проводилась для гусеничной

четырёхкатковой БПТП оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской (Рис. 6.18).

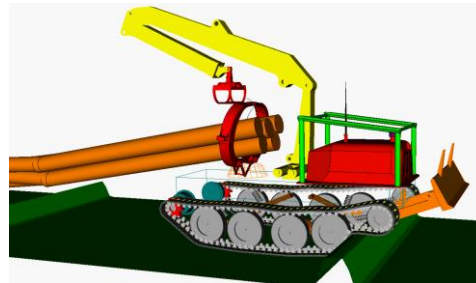
График изменения вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской при преодолении единичных препятствий в виде поваленного дерева представлен на Рис. 6.19.



300 мм; T=36 сек



400 мм; T=43 сек



500 мм – машина не преодолела; T= 51 сек

Рис. 6.18. Фрагменты преодоления единичных препятствий в виде поваленного дерева гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской



Рис. 6.19. Изменение вертикальных реакций под катками БПТМ с коником при преодолении препятствий в виде поваленного дерева (0,5 м не преодолела)

6.2.4. Оценка предельной высоты преодолеваемого единичного препятствия в виде пня

Для установления предельных характеристик преодолеваемых пней в условиях участка виртуальной лесосеки была разработана специальная методика испытаний. На участке виртуальной лесосеки последовательно размещались искусственные препятствия, имитирующие пни, с начальными параметрами $0,1 \times 0,1$ м. Каждое последующее препятствие увеличивалось по высоте и диаметру с шагом 10 см, располагаясь через 8 метров, достигая максимального размера $0,7 \times 0,7$ м.

На Рис. 6.20 представлены фрагменты переезда через единичные препятствия в виде пня гусеничной шестикатковой БПТМ оснащенной паковым захватом и упруго-рычажно-балансирной подвеской.

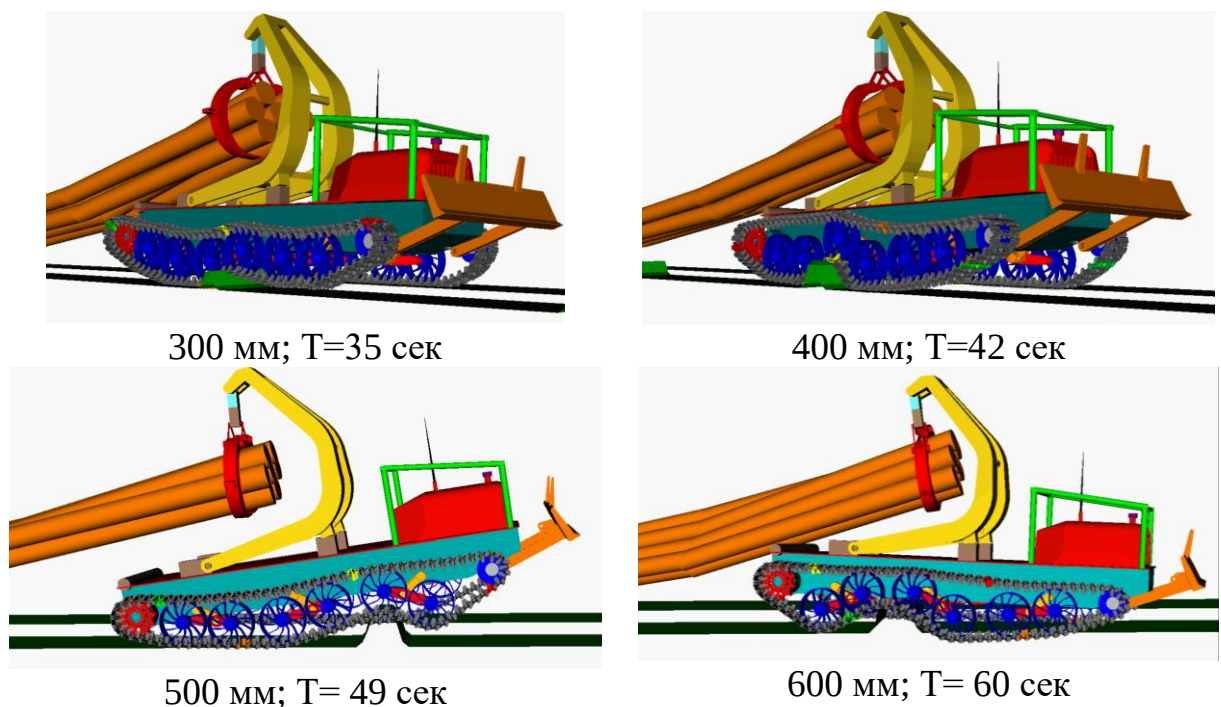


Рис. 6.20. Последовательные положения при преодолении единичных препятствий в виде пня гусеничной БПТМ оснащенной пачковым захватом и упруго-рычажно-балансирной подвеской

Виртуальный эксперимент проводился при равномерном движении гусеничных БПТМ со скоростью 3,6 км/ч. Критерием определения предельной высоты преодолемого пня служила высота последней успешно пройденной неровности, после которой следовало препятствие, вызывающее потерю

подвижности. Потеря подвижности возникала вследствие двух основных факторов: превышения допустимых геометрических параметров машины и недостаточного сцепления гусениц с поверхностью.

На Рис. 6.21. представлен график изменения вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ оснащенной пачковым захватом и упруго-рычажно-балансирной подвеской при преодолении правым бортом машины единичных препятствий в виде пня характеризуемых высотой и шириной от 0,1х0,1м, с возрастанием высоты и ширины каждого последующего единичного препятствия на 0,1 м с интервалами 8 м до препятствия 0,7х0,7 м.

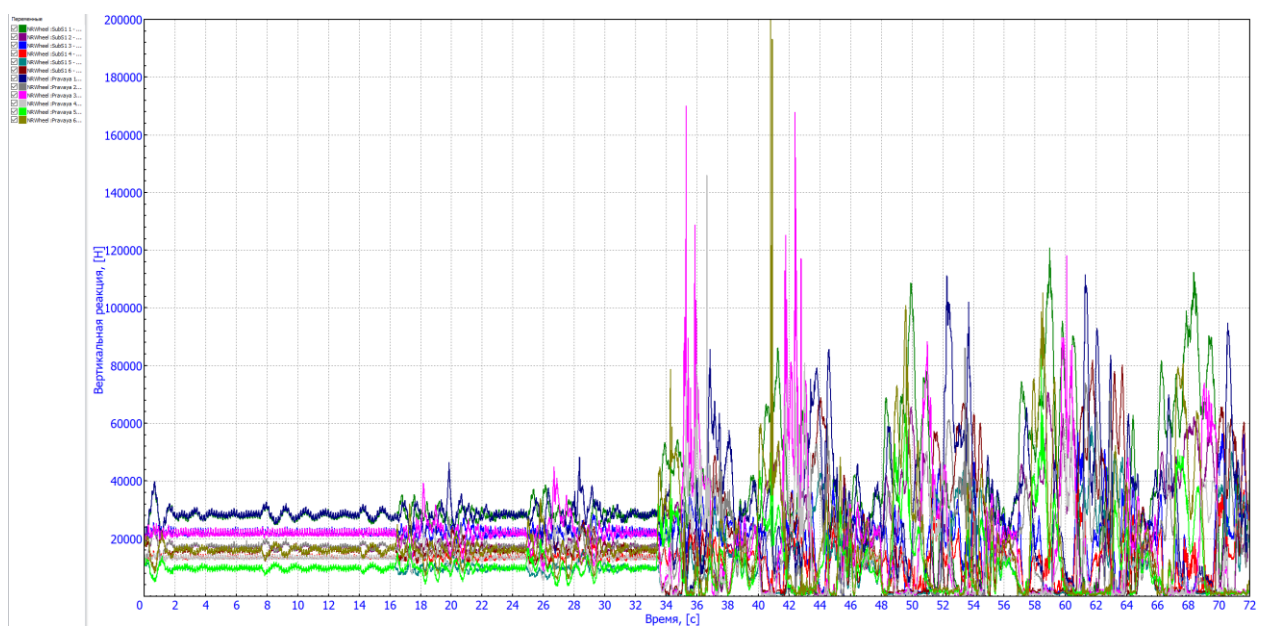
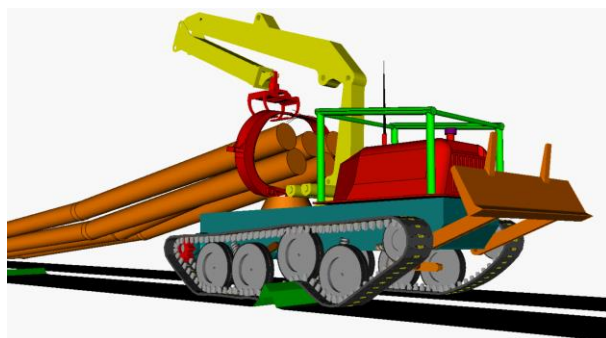


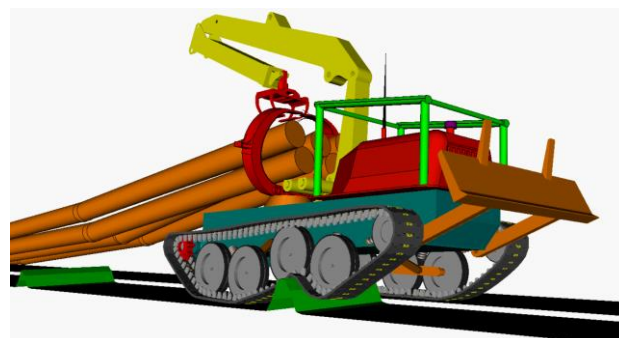
Рис. 6.21. Изменение вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ с пачковым захватом при преодолении единичных препятствий в виде пня высотой 0,1 - 0,7 м с интервалами 8 м

Гусеничная БПТМ с пачковым захватом преодолела все единичные препятствия в виде пня высотой от 0,1 до 0,7 м.

Аналогичная оценка предельной высоты преодолеваемого единичного препятствия в виде пня проводилась для гусеничной четырехкатковой БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской (Рис. 6.22).



300 мм; $T=35$ сек



400 мм; $T=42$ сек

Рис. 6.22. Фрагменты преодоления единичных препятствий в виде пня гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской

График изменения вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской при преодолении единичных препятствий в виде пня представлен на Рис. 6.23.

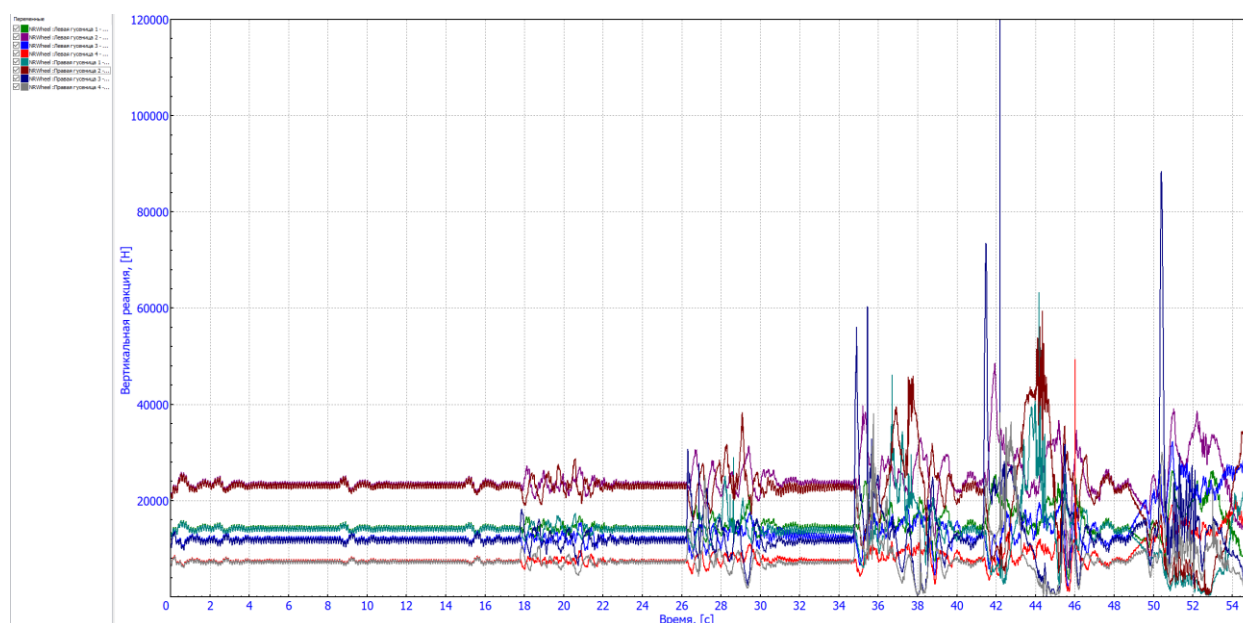


Рис. 6.23. Изменение вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором при преодолении единичных препятствий в виде пня высотой 0,1 - 0,5 м с интервалами 8 м

Гусеничная БПТМ оснащенная самозажимным коником с манипулятором преодолела единичные препятствия в виде пня высотой от 0,1 до 0,5 м включительно. Препятствие высотой 0,6 м и более машина не преодолела.

6.2.5. Оценка предельной высоты преодолеваемого уступа

В ходе виртуальных экспериментов на специально смоделированном участке виртуальной лесосеки исследовалась проходимость машин при преодолении вертикальных препятствий. Полигон включал серию уступов с постепенно увеличивающейся высотой. Виртуальный эксперимент проводился при двух скоростных режимах: 7,2 км/ч и 3,6 км/ч.

Критерием предельной высоты считалось значение, при котором следующее по величине препятствие вызывало остановку машины. Потеря подвижности возникала вследствие:

- превышения допустимых габаритных параметров;
- недостаточного сцепления гусениц с поверхностью (тягово-сцепных).

В ходе компьютерного моделирования осуществлялся постоянный контроль нагрузочных характеристик опорных катков. Критическим критерием оценки являлось соблюдение условия, при котором эксплуатационные нагрузки не превышали десятикратного значения статической грузоподъемности отдельного катка [74, 112, 170].

Результаты виртуального эксперимента показали:

- для модели с пачковым захватом критическая высота составляет 0,8 м (Рис. 6.24);
- практически достижимый предел - 0,7 м (Рис. 6.25);
- визуализация преодоления 0,7-метрового уступа при скорости 7,2 км/ч представлена на Рис. 6.25



Рис. 6.24. Момент потери подвижности гусеничной БПТМ (6 опорных катков) с пачковым захватом (уступ 0,8 м)

На Рис. 6.26 представлен график изменения вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ оснащенной пачковым захватом и упруго-

рычажно-балансирной подвеской при преодолении уступа высотой 0,7 м со скоростью 7,2 км/ч.

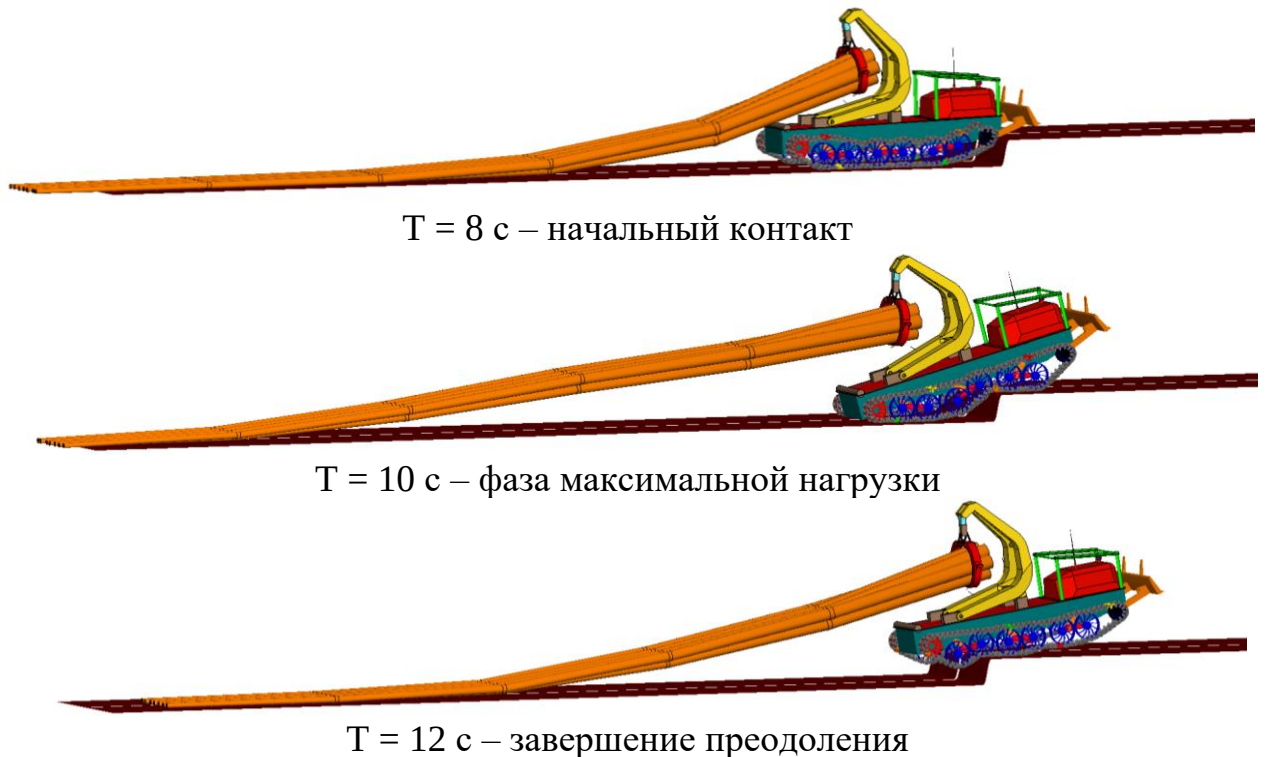


Рис. 6.25. Этапы преодоления 0,7-метрового препятствия БПТМ с пачковым захватом и упруго-рычажно-балансирной подвеской (7,2 км/ч)

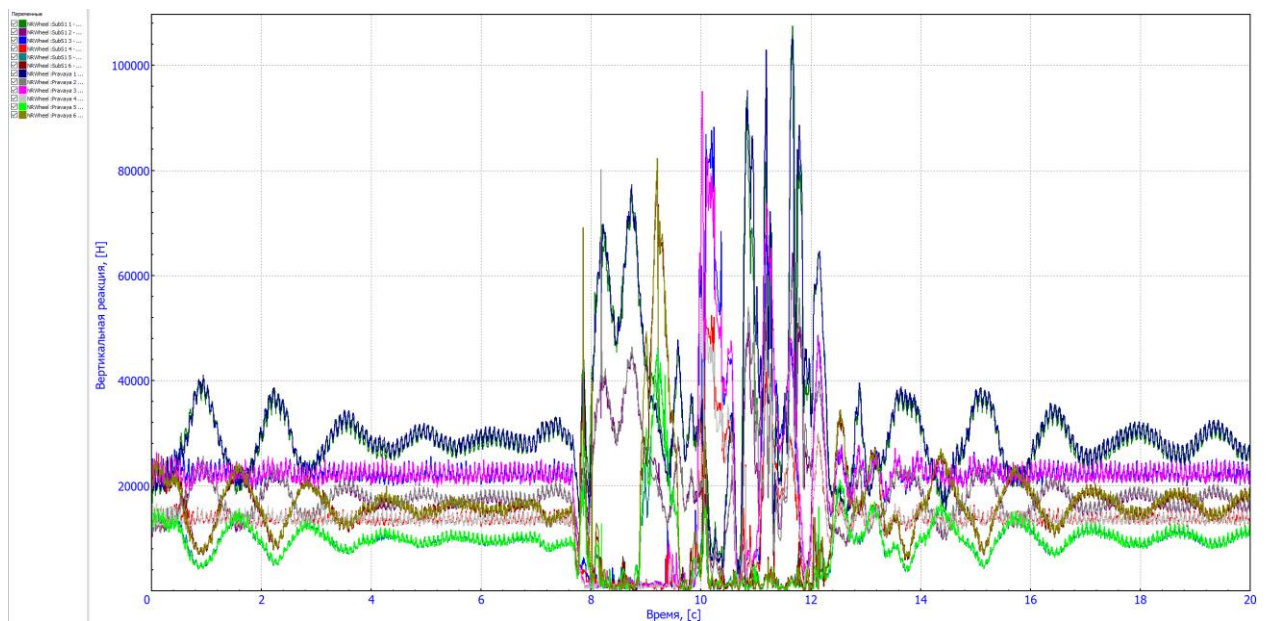


Рис. 6.26 Распределение вертикальных реакций опорных катков БПТМ с пачковым захватом при преодолении 0,7-метрового уступа (7,2 км/ч)

Аналогичная оценка предельной высоты преодолеваемого уступа проводилась для гусеничной четырехкатковой БПТП оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской.

Из-за геометрических ограничений происходит потеря подвижности гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором при преодолении уступа высотой 0,8 м, что зафиксировано на Рис. 6.27, где показан критический момент преодоления такого препятствия. В результате максимальная высота преодолеваемого уступа гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором составляет 0,7 м.

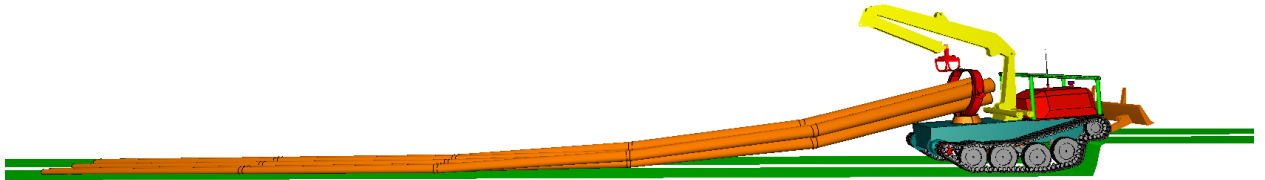
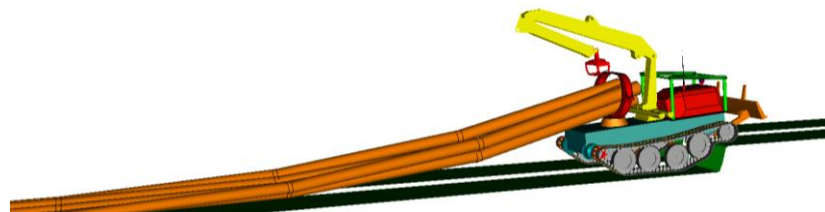
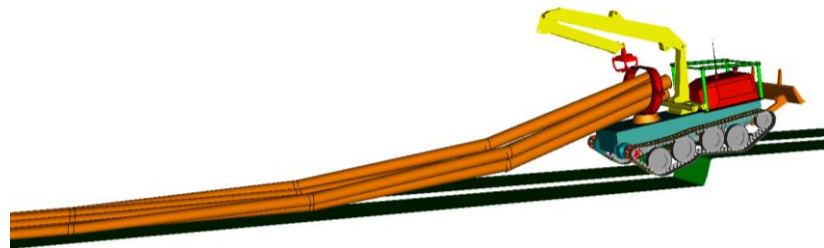


Рис. 6.27. Положение гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором, соответствующее моменту потери подвижности, при преодолении вертикального уступа высотой 0,8 м

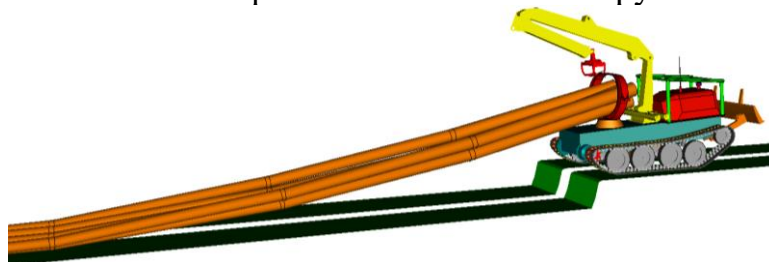
Последовательные положения гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором при преодолении уступа высотой 0,7 м со скоростью 3,6 км/ч представлены на Рис. 6.28.



$T = 18 \text{ с}$ – начальный контакт



$T = 20 \text{ с}$ – фаза максимальной нагрузки



$T = 22 \text{ с}$ – завершение преодоления

Рис. 6.28 Преодоление 0,7-метрового уступа на скорости 3,6 км/ч гусеничной БПТМ с самозажимным коником и упругой рычажно-балансирной подвеской

Рис. 6.29 отображает соответствующие изменения вертикальных нагрузок на опорные катки гусеничной БПТМ с самозажимным коником и упругой рычажно-балансирной подвеской при преодолении 0,7-метрового уступа на скорости 3,6 км/ч.

При увеличении скорости до 7,2 км/ч во время преодоления уступа высотой 0,7 м: наблюдается критическая перегрузка опорных катков; превышение 10-кратного значения статической нагрузки; полная потеря подвижности (Рис. 6.30).

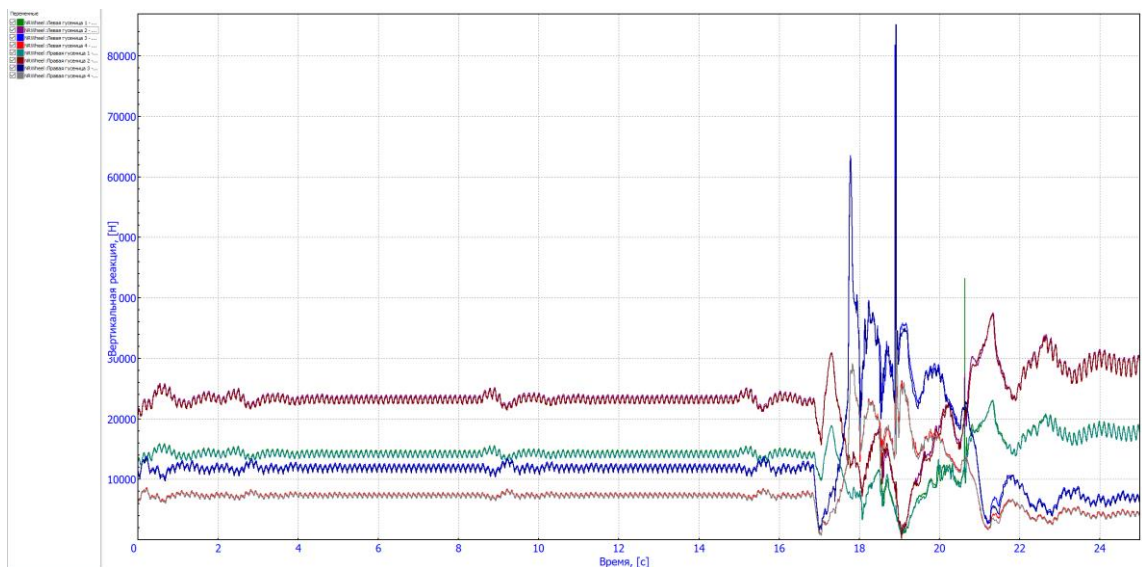


Рис. 6.29. Изменение вертикальных реакций под катками БПТМ оснащенной коником с манипулятором при преодолении уступа высотой 0,7 м (3,6 км/ч)

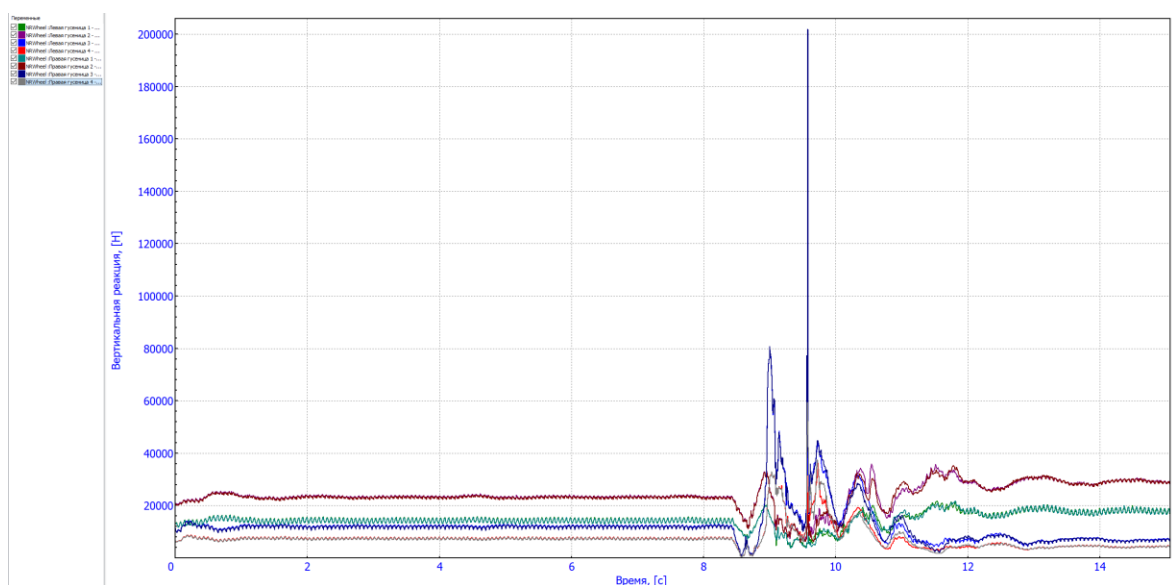


Рис. 6.30. Изменение вертикальных реакций под катками БПТМ (4 опорных катка) оснащенной коником при преодолении уступа высотой 0,7 м (7,2 км/ч)

6.2.6. Оценка предельной высоты преодолеваемого контрэскарпа

Методика исследования проходимости при преодолении контрэскарпов основана на аналогичных принципах, представленных выше. На специально созданной виртуальной испытательной лесосеке размещались искусственные контрэскарпы с прогрессивно увеличивающейся высотой. Моделирование проводилось при постоянной скорости движения гусеничных БПТМ - 7,2 км/ч.

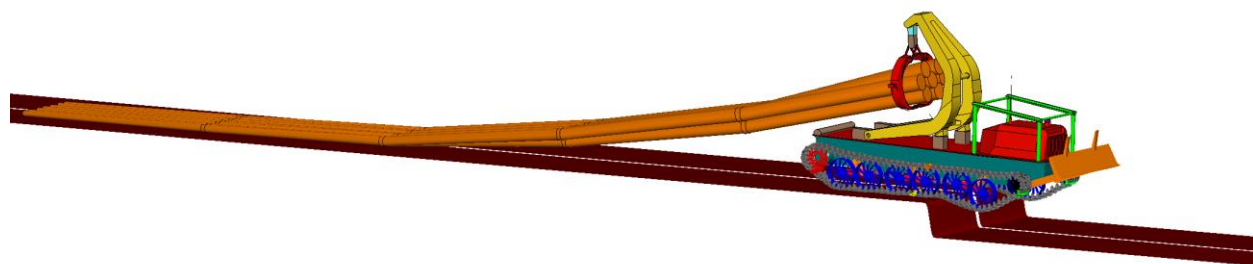
Критерием потери подвижности считалась высота последнего успешно преодоленного контрэскарпа, после которого следующее препятствие вызывало:

- геометрические ограничения (механический контакт корпуса машины с препятствием);
- превышение допустимой нагрузки на опорные катки (более 10-кратного значения статической нагрузки).

В ходе виртуального эксперимента осуществлялся постоянный мониторинг нормальных реакций под каждым опорным катком с соблюдением условия прочности [74, 112, 170].

На Рис. 6.31 представлена пошаговая визуализация преодоления контрэскарпа высотой 0,8 м гусеничной БПТМ, оборудованной пачковым захватом, при заданной скорости 7,2 км/ч. При движении на 15 сек наблюдается взаимодействие пачки хлыстов с корпусом машины, для устранения взаимодействия в конструкции трелевочного оборудования предусмотрена возможность ослабления колонны пачкового захвата, что позволит сместить ее назад и исключить взаимодействие пачки с корпусом.

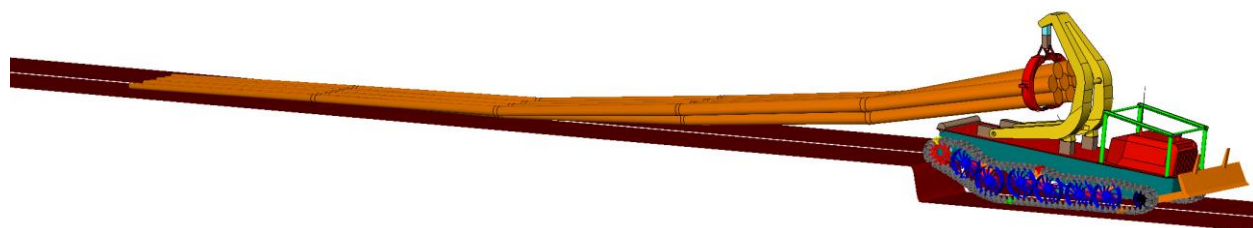
На Рис. 6.32 представлен график изменения вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ с пачковым захватом при преодолении контрэскарпа 0,8 м со скоростью 7,2 км/ч.



$T = 14 \text{ с}$



$T = 15 \text{ с}$; пачка упирается в машину – при ослаблении троса колонна пачкового захвата сместится назад (особенность технологической операции)



$T = 16 \text{ с}$

Рис. 6.31. Последовательные положения гусеничной БПТМ с пачковым захватом при преодолении контрэскарпа высотой 0,8 м со скоростью 7,2 км/ч

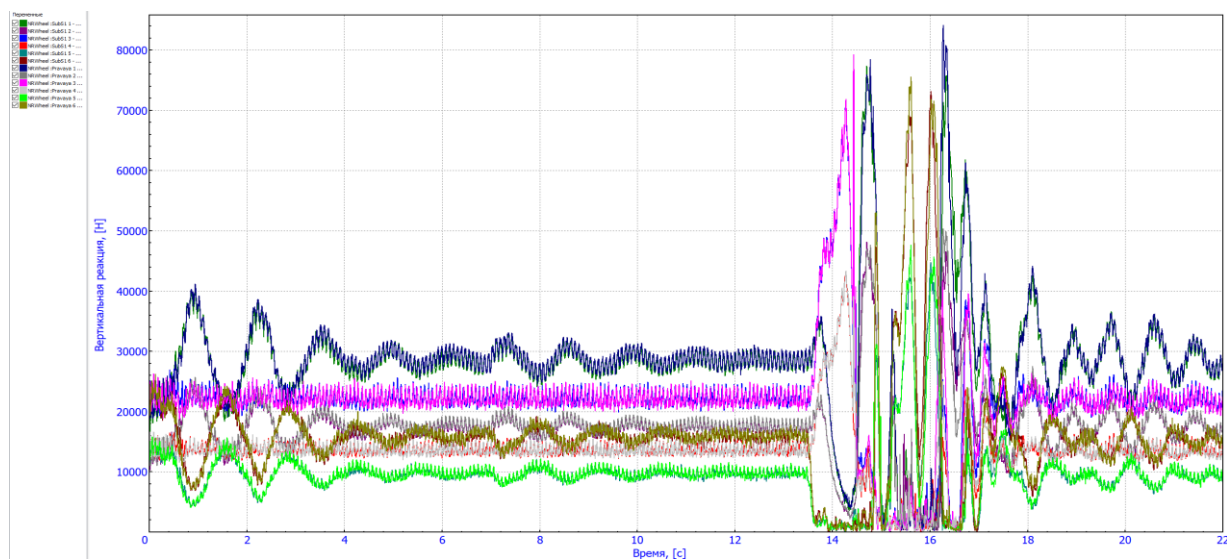


Рис. 6.32. Вертикальные реакции под опорными катками гусеничной БПТМ (6 катков) с пачковым захватом при преодолении контрэскарпа 0,8 м (7,2 км/ч)

Аналогичная оценка предельной высоты преодолеваемого контрэскарпа проводилась для гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской.

График изменения вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ, оснащенной самозажимным коником с манипулятором и упругой рычажно-балансирной подвеской при преодолении контрэскарпа высотой 0,8 м со скоростью 7,2 км/ч представлен на Рис. 6.33.

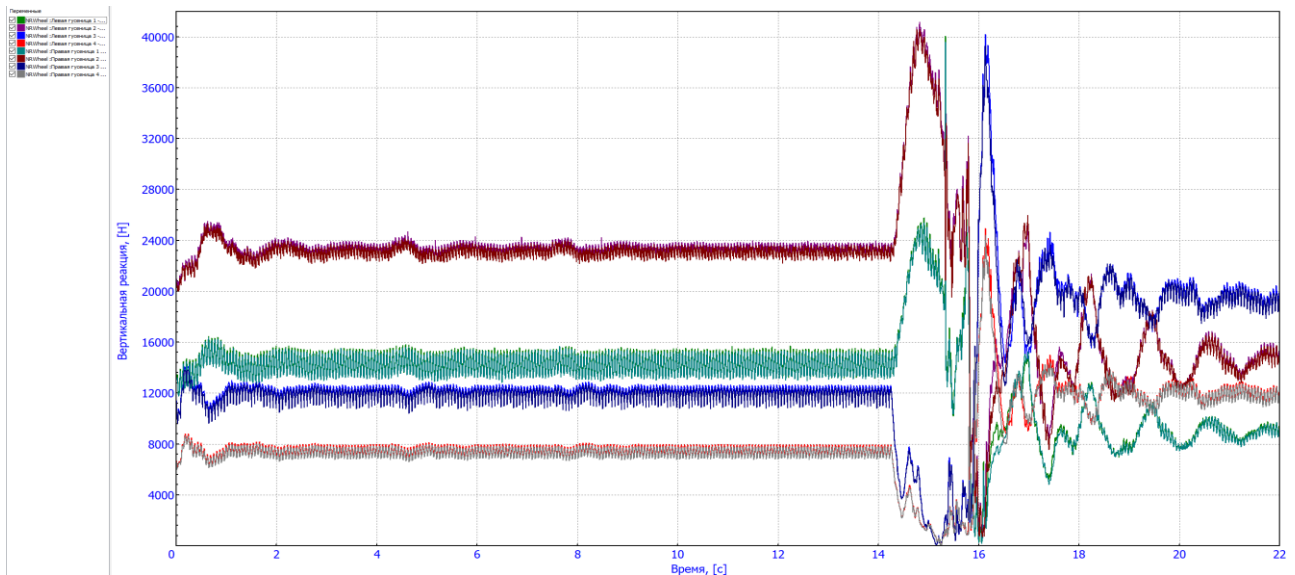


Рис. 6.33. Изменение вертикальных реакций под опорными катками гусеничной БПТМ (4 опорных катка) оснащенной самозажимным коником с манипулятором при преодолении контрэскарпа 0,8 м (7,2 км/ч)

Последовательные положения гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором при преодолении контрэскарпа высотой 0,8 м со скоростью 7,2 км/ч представлены на Рис. 6.34.

В ходе виртуального эксперимента выявлено, что потери подвижности гусеничных БПТМ с пачковым захватом, а также БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором при преодолении контрэскарпа высотой 0,8 м не происходит, но у БПТМ с пачковым захватом наблюдаются превышения статической нагрузки в 6-кратном значении.

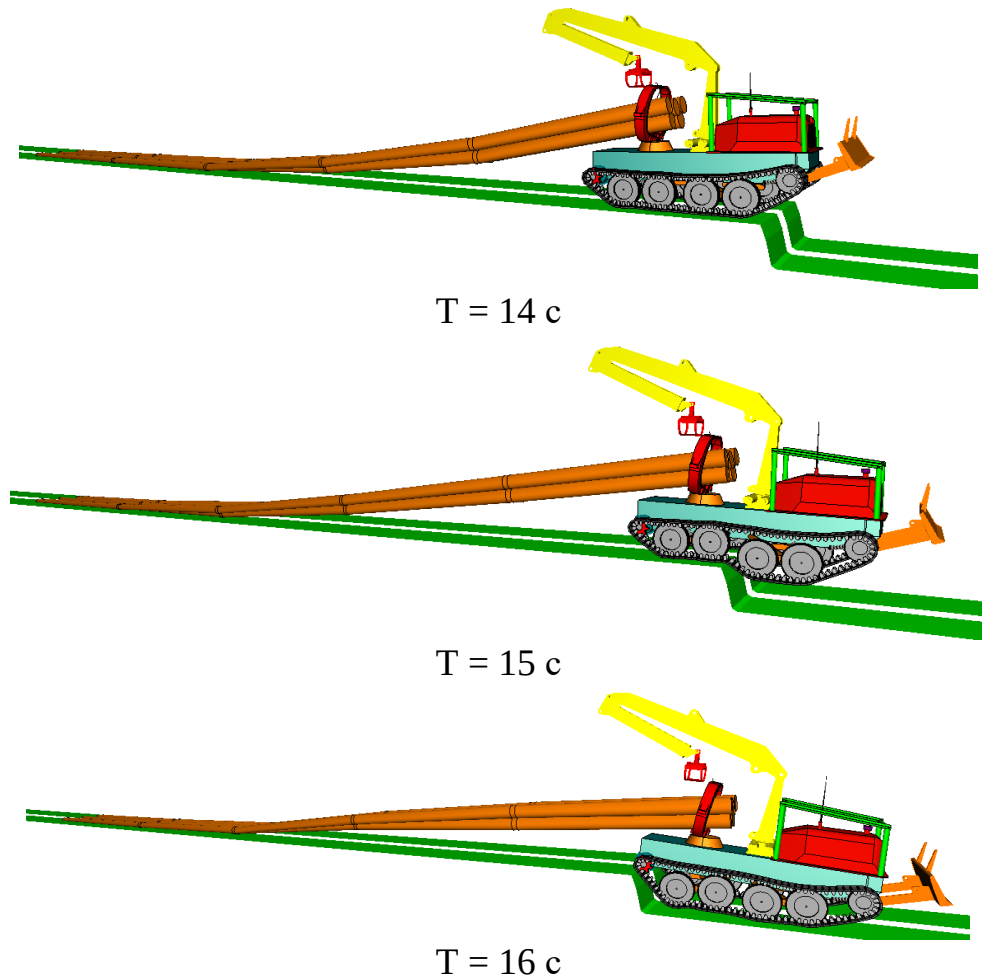


Рис. 6.34. Последовательные положения гусеничной БПТМ оснащенной самозажимным коником с манипулятором при преодолении контрэскарпа высотой 0,8 м со скоростью 7,2 км/ч

6.3. Исследование движения колесных и гусеничных машин в процессе трелевки по маршрутам трелевочного волока виртуальной лесосеки и при выполнении маневров

Исследование движения колесных и гусеничных БПТМ в процессе трелевки осуществлялось на виртуальной лесосеке, содержащей базу данных типовых условий эксплуатации лесозаготовительных машин и параметризованные характеристики дорожно-грунтовых условий. Параметры криволинейных участков трелевочного волока виртуальной лесосеки, сформированные с учетом требований [13], [89] и приведены на Рис. 6.35.

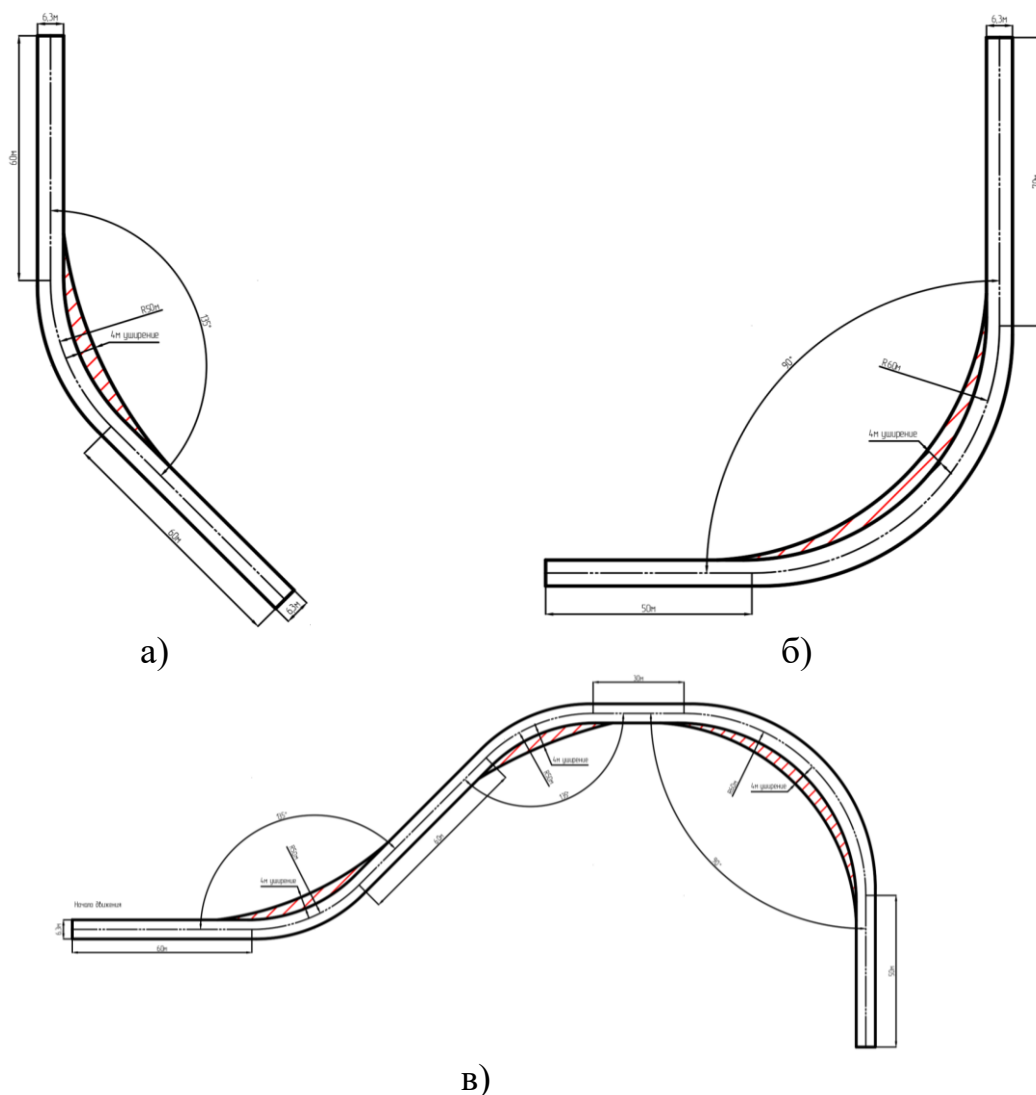


Рис. 6.35. Параметры криволинейных участков волока виртуальной лесосеки:

а) поворот 135° ; б) поворот 90° ; в) поворот 135° , 135° , 90°

Методом компьютерного моделирования, основанного на законах управления, были построены траектории движения колесных и гусеничных БПТМ по трелевочному волоку (Рис. 6.35).

6.3.1. Моделирование движения гусеничных беспилотных трелевочных машин

На виртуальной испытательной лесосеке для криволинейных участков волока (Рис. 6.35) была проведена серия экспериментов движения по траекториям гусеничными и колесными БПТМ с пачкой хлыстов для оценки адекватности работы созданных динамических моделей. В ходе моделирования движения гусеничной БПТМ получены данные о частотах вращения и моментах на ведущих колесах обоих бортов. На Рис. 6.36 – 6.37 представлены фрагменты

движения гусеничной БПТМ со скоростью 2 м/с по участку виртуальной лесосеки (6.35 а) с учетом перемещения БПТМ с пачкой из центра (T_1) волока к краю (T_2^n) на величину k_n (Рис. 5.1) позволяя исключить выезд конца пачки за пределы волока при дальнейшем повороте.

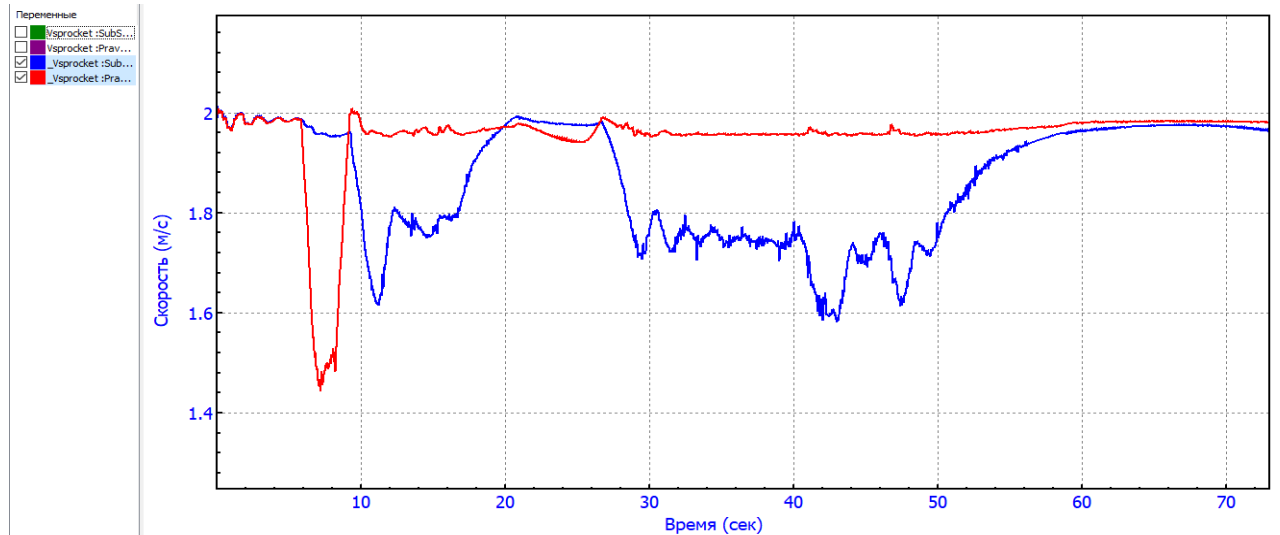


Рис. 6.36. Скорость на ведущих колесах при движении по криволинейному участку волока (Рис. 6.35а)

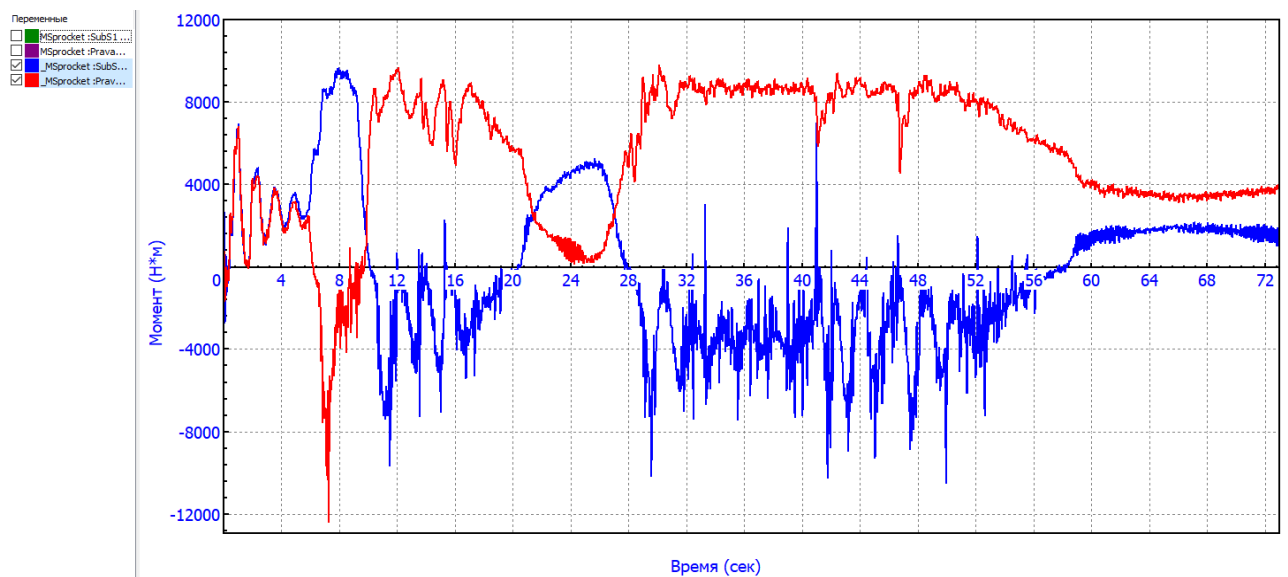


Рис. 6.37. Момент на ведущих колесах при движении по криволинейному участку волока (Рис. 6.35а)

На основе известных зависимостей между моментами, передаваемыми на ведущие колеса, и их частотами вращения определены требуемые механические характеристики для различных вариантов механизмов передачи и поворота (МПП). Наибольшая эффективность управления поворотом достигнута при

применении двухпоточного дифференциального механизма поворота с гидрообъемной передачей (ГОП) в параллельном потоке мощности.

Также на виртуальной испытательной лесосеке для каждого из представленных участков 1-3 описанных ниже была проведена серия экспериментов движения по траекториям гусеничными БПТМ с пачкой хлыстов для оценки адекватности работы созданных динамических моделей (Рис. 6.38).

Участок №1 – поворот БПТМ на пасечном волоке ($R=10\text{м}$).

Участок №2 – поворот БПТМ на магистральном волоке ($R=30\text{м}$).

Участок №3 – криволинейная траектория выезда БПТМ с пасечного на магистральный волок.

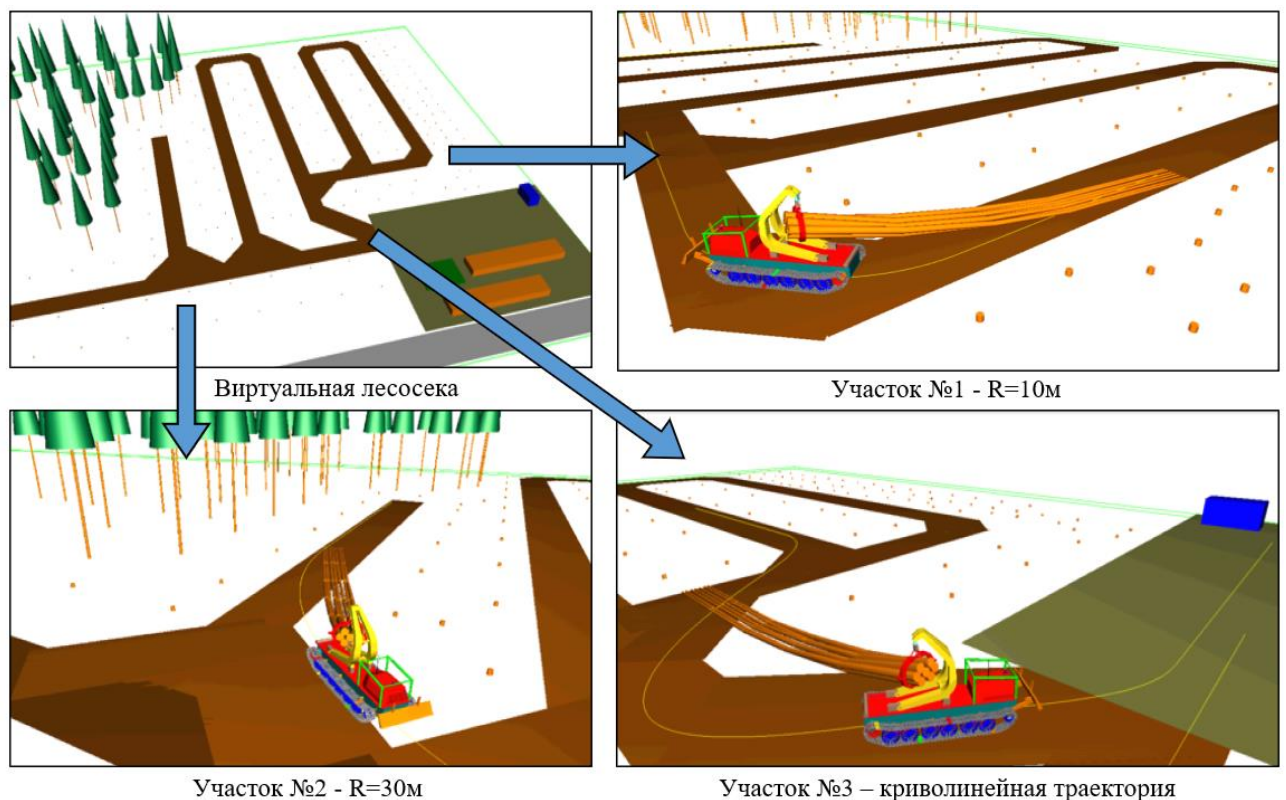


Рис. 6.38. Фрагменты движения модели гусеничной БПТМ с пачковым захватом на участках виртуальной лесосеки

В ходе моделирования для каждого из участков были получены характеристики скоростей и моментов на ведущих колесах, для последующей оценки параметров элементов трансмиссии БПТМ. При повороте БПТМ на пасечном волоке ($R=10\text{м}$) со скоростью 2 м/с соответствующие характеристики представлены на Рис. 6.39 – 6.40.

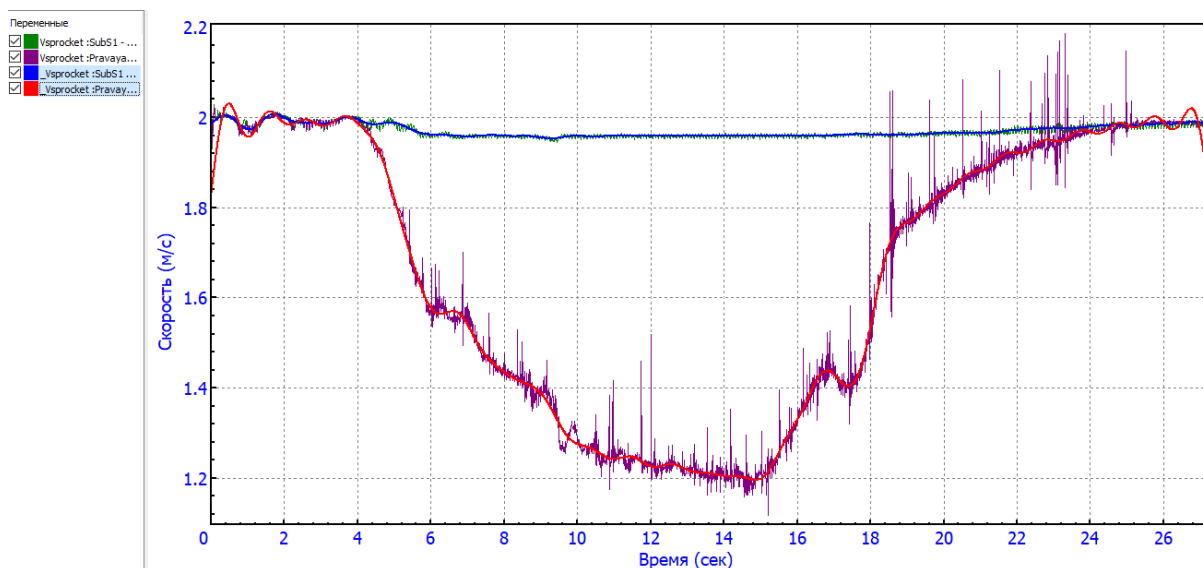


Рис. 6.39. Скорость на ведущих колесах при повороте на пасечном волокне ($R=10\text{м}$)

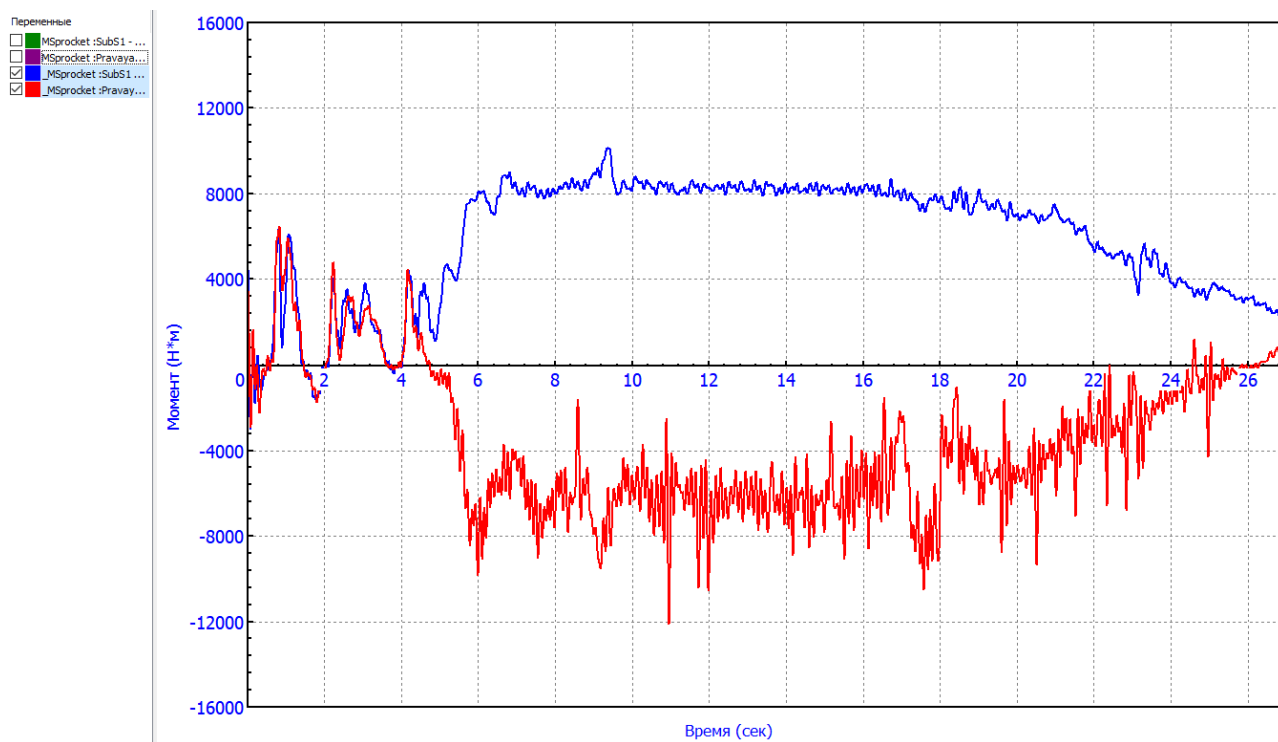


Рис. 6.40. Момент на ведущих колесах при повороте на пасечном волокне ($R=10\text{м}$)

Аналогично при повороте БПТМ на магистральном волокне ($R=30\text{м}$) фрагменты результатов представлены на Рис. 6.41 – 6.42.

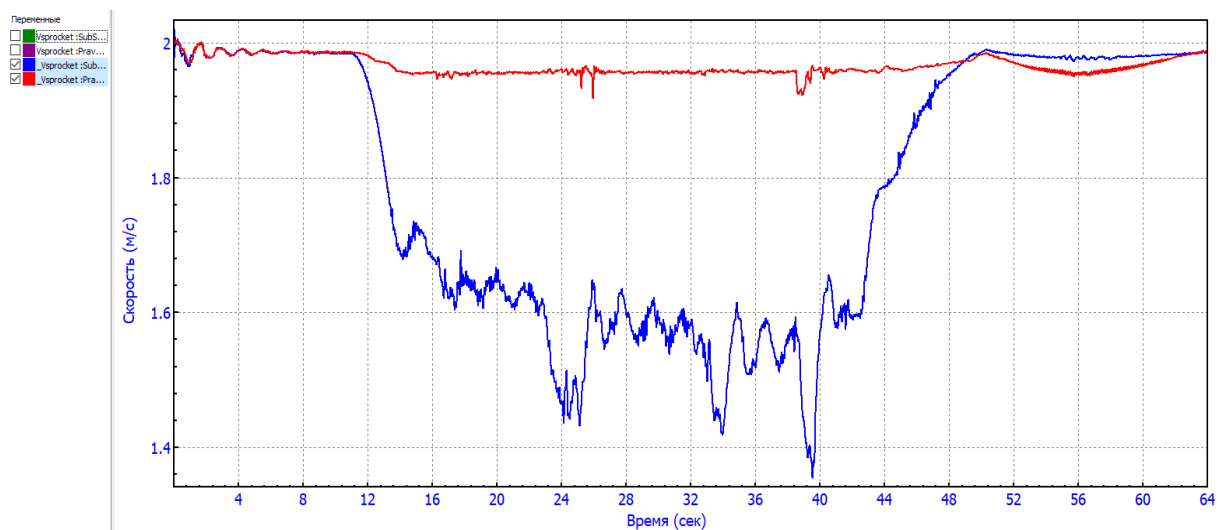


Рис. 6.41. Скорость на ведущих колесах при повороте на магистральном волокне
($R=30\text{м}$)

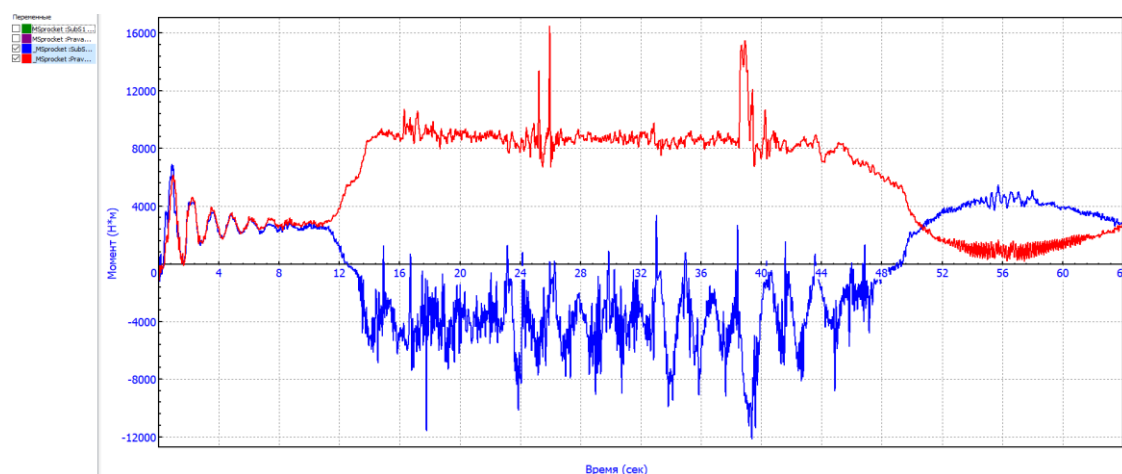


Рис. 6.42. Моменты на ведущих колесах при повороте на магистральном волокне
И при движении БПТМ по криволинейной траектории фрагменты
результатов представлены на Рис. 6.43 – 6.44.

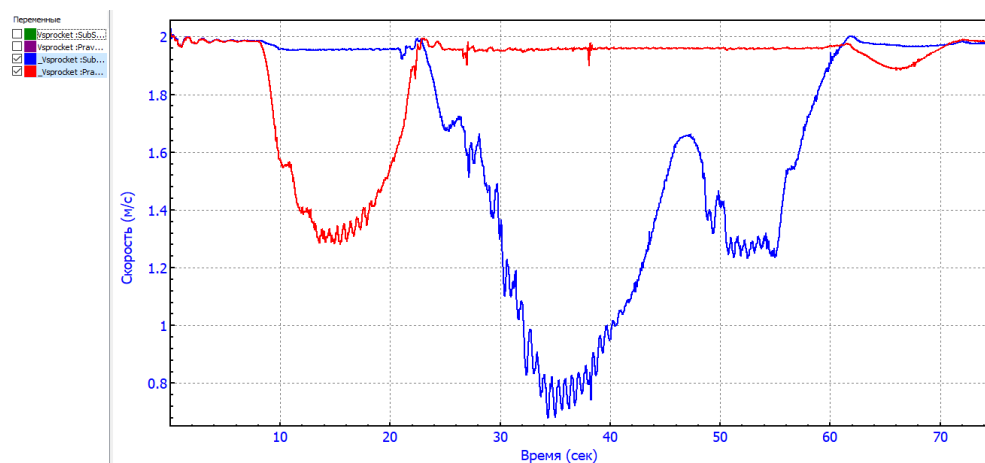


Рис. 6.43. Скорость на ведущих колесах при движении по криволинейной
траектории

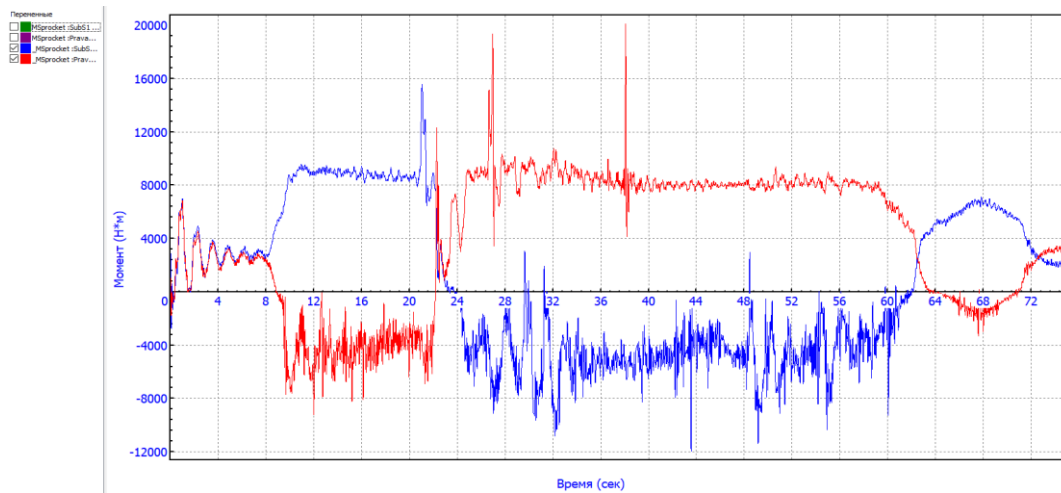


Рис. 6.44. Моменты на ведущих колесах при движении по криволинейной траектории

Исследования показали, что для гусеничных БПТМ, работающих на лесосеке, повышение управляемости может быть обеспечено заменой традиционных механизмов поворота типа «бортовой фрикцион» на планетарные механизмы с тормозами, управляемыми гидроприводом.

Кроме того, установлено, что для перспективных гусеничных лесозаготовительных машин наиболее рациональной схемой привода ведущих колес, обеспечивающей максимальную маневренность, является гибридный МПП, в котором параллельный поток мощности реализуется через электродвигатель. Индивидуальный привод ведущих колес рационально применять в случае гусеничной БПТМ с малым $L/V = [1...1,2]$.

6.3.1.1. Исследование энергоэффективности движения гусеничных беспилотных трелевочных машин на волоке при различных условиях

Для анализа эффективности разработанных законов и сравнительной оценки энергоэффективности различных моделей гусеничных БПТМ рассмотрим их движение по траектории трелёвочного волока показанной на Рис. 6.45.

Волок протяженностью 300 м., содержит два извилистых участка (с учетом требований к хлыстовой технологии лесозаготовки), что увеличивает энергозатраты на повороты. Это позволяет наиболее точно сравнить энергоэффективность исследуемых моделей гусеничных БПТМ, поскольку на прямых участках различия в их энергопотреблении практически отсутствуют.

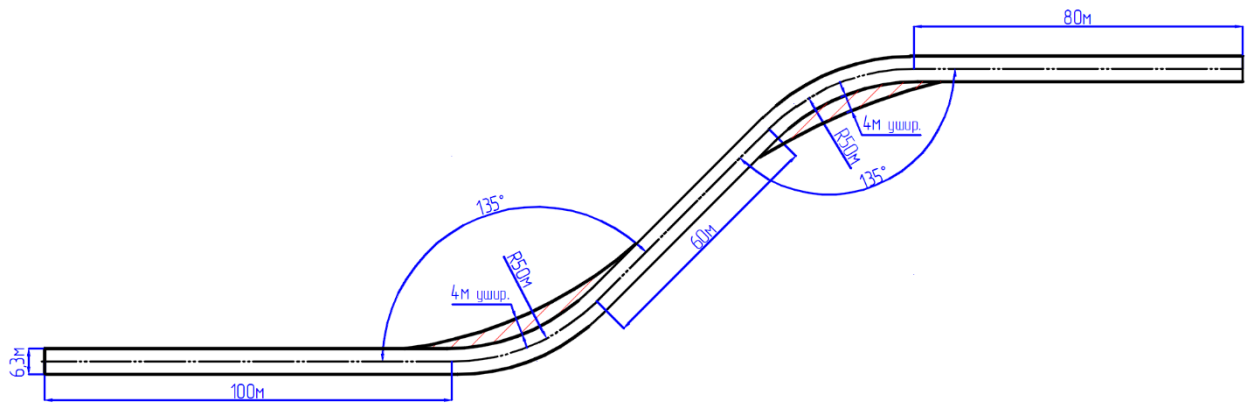


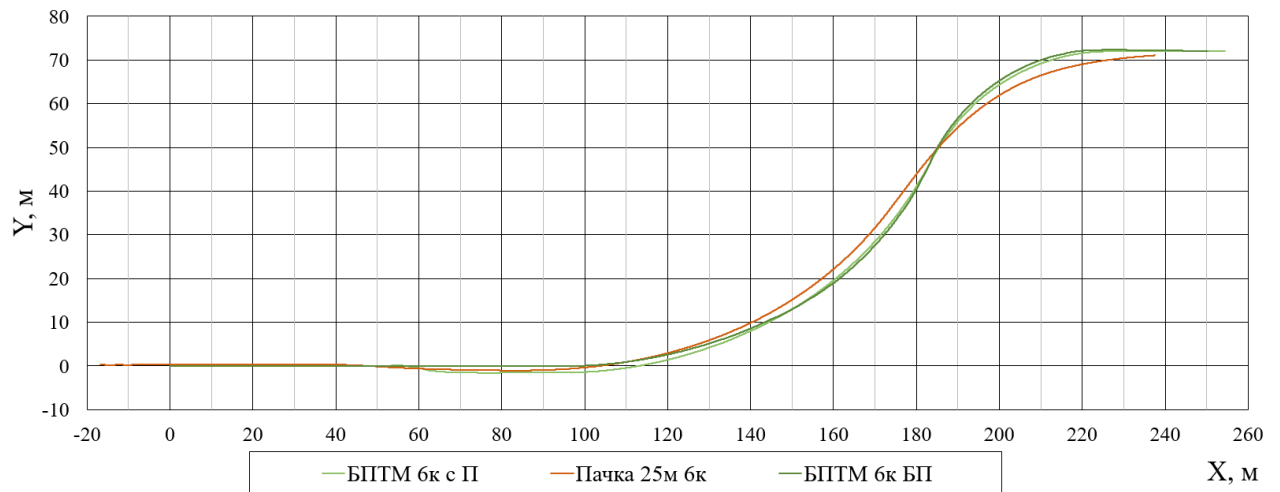
Рис. 6.45. Траектории трелёвочного волока

Сравнение энергоэффективности проводится на основе общего расхода энергии $E_{\text{БПТМ}}$ за полный цикл трелевки. Цикл включает в себя прохождения гусеничной БПТМ маршрута волока в порожнем состоянии от верхнего склада до места сбора пачки на лесосеке, разворот и трелевка пачки до верхнего склада, таким образом общая протяженность маршрута составляет 600 м. Ширина допустимого коридора для точки O_c установлена в 6,3 м, а скорость движения поддерживается на уровне 7,2 км/ч.

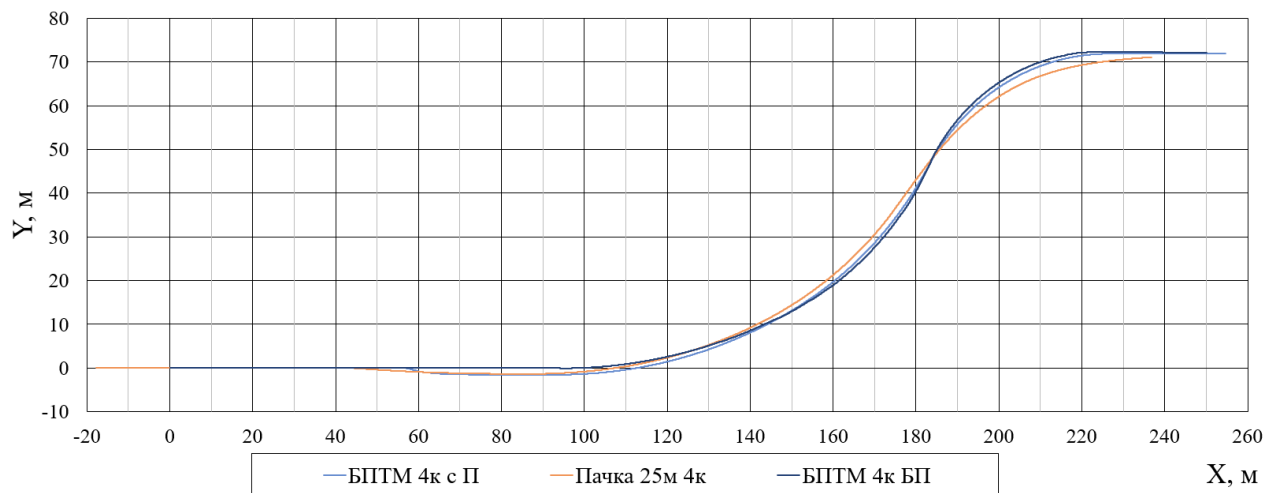
На Рис. 6.46 изображены траектории движения точки O_c для разных моделей БПТМ: без груза (БПТМ БП) и с пачкой (БПТМ с П) на обратном пути, а также траектория точки O_e пачки хлыстов. Во всех рассмотренных случаях траектория точки O_c не выходит за границы заданного коридора.

На основе данных Главы 1 о высоте пней на лесосеке и среднем расстоянием между ними [47] можно рассчитать количество затрачиваемой энергии при движении, так на 300 м волока – 60 пней высотой 300 мм. Количество энергии, требуемое для преодоления пня: $A1 = 0,15 \cdot G_{\text{сум}} \cdot h$.

В Таблице 26 представлены результаты оценки количества энергии необходимой гусеничным БПТМ на преодоление пней, встречающихся на участке волока протяжённости 300 м. Расчеты проведены для движения в порожнем состоянии (холостой ход) и с пачкой (рабочий ход) на обратном пути.



а)



б)

Рис. 6.46. Траектории движения для различных гусеничных БПТМ точки O_c и точки O_v пачки хлыстов: а) – шестикатковая БПТМ с пачковым захватом; б) – четырехкатковая БПТМ с самозажимным коником и манипулятором

Таблица 26.

Энергозатраты на преодоление единичных неровностей

Затраты энергии, кДж	Гусеничная БПТМ			
	Пачковый захват			Коник
	Шестикатковая 10 м ³	Шестикатковая 8 м ³	Четырехкатковая 8 м ³	Четырехкатковая 8 м ³
Холостой ход	423,6	423,6	370,7	330,9
Рабочий ход	583,2	550,8	498,4	458,5

Для различных вариантов гусеничных БПТМ осуществлялось определение затраченной энергии $E_{\text{БПТМ}}$ за время движения по заданному маршруту волока

(Рис.6.45). В Таблице 27 представлены условия, при которых осуществлялось моделирование с учетом проходности машин по волоку.

Таблица 27.

Условия моделирования

Параметр	Минимальное сопротивление		Максимальное сопротивление	
Сезон	зима, снежный покров		лето, влажный грунт	
Тип груза	хлысты	без груза	деревья	без груза
коэффициент сопротивления волочению f_c (Таблица 16, п. 1.1 и 2.2)	0,10	-	0,60	-
коэффициент сопротивления движению машины f (Таблица 25, 1 и 3 проход)	0,08	0,07	0,10	0,09

Результаты определения затраченной энергии $E_{\text{БПТМ}}$ за время движения по заданному маршруту волока для различных вариантов гусеничных БПТМ с механизмом поворота (МП) одностороннего (одно.) и симметричного (симм.) типа представлены в Таблице 28.

Таблица 28.

Результаты сравнительной оценки движения гусеничных БПТМ

Затраты энергии $E_{\text{БПТМ}}$, кДж	Условия	Гусеничная БПТМ с пачкой			
		Пачковый захват			Коник
		Шестикатковая 10 м ³	Шестикатковая 8 м ³ МП	Четырехкатковая 8 м ³	Четырехкатковая 8 м ³
		МП одно. / симм.	МП одно. / симм.	МП одно. / симм.	МП одно. / симм.
Холостой ход	Мин. сопр.	4342,8 / 3984,3	4342,8 / 3984,3	3787,2 / 3481,5	3372,7 / 3108,4
	Макс. сопр.	5291,5 / 4850,1	5291,5 / 4850,1	4751,6 / 4363,2	4114,9 / 3785,6
Рабочий ход	Мин. сопр.	7759,9 / 7106,1	7192,0 / 6592,1	6390,1 / 5859,8	6123,3 / 5615,9
	Макс. сопр.	14015,4 / 12799,5	12350,9 / 11290,6	11622,0 / 10630,3	11070,1 / 10130,3
Всего за цикл	Мин. сопр.	12102,7 / 11090,4	11534,8 / 10576,4	10177,3 / 9341,3	9496,0 / 8724,3
	Макс. сопр.	19306,9 / 17649,6	17642,4 / 16140,7	16373,6 / 14993,5	15185,0 / 13915,9

Анализ данных из Таблицы 28 показывает, что четырехкатковая гусеничная БПТМ с симметричным МП, оснащенная самозажимным коником и манипулятором, демонстрирует наименьший расход энергии (13915,9 кДж) при перемещении по волоку с пачкой объемом 8 м³ в условиях максимального сопротивления (Таблица 27).

Наибольшие энергозатраты (19306,9 кДж) наблюдаются у шестикатковой БПТМ с односторонним МП и пачковым захватом при транспортировке пачки 10 м³ это в 1,39 раза выше, чем у четырехкатковой модели с коником и пачкой 8 м³.

Для шестикатковой БПТМ с пачкой 8 м³ минимальный расход энергии зафиксирован у симметричного МП (16140,7 кДж), что на 16% больше, чем у аналогичной четырехкатковой машины.

Для снижения энергопотребления и повышения автономности при трелевке пачек до 8 м³ рекомендуется использовать четырехкатковую БПТМ с коником или пачковым захватом. Хотя машина с коником требует дополнительных энергозатрат на работу манипулятора (в сумме ~14993,5 кДж), общий расход остается сопоставимым с вариантом, оснащенным пачковым захватом. Таким образом, четырехкатковая конструкция является более энергоэффективной в указанных условиях.

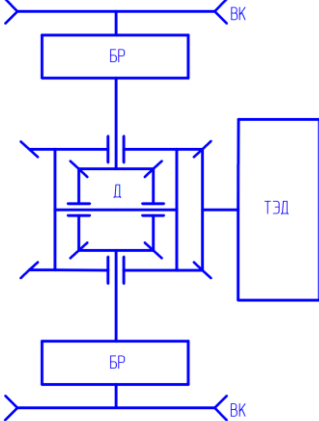
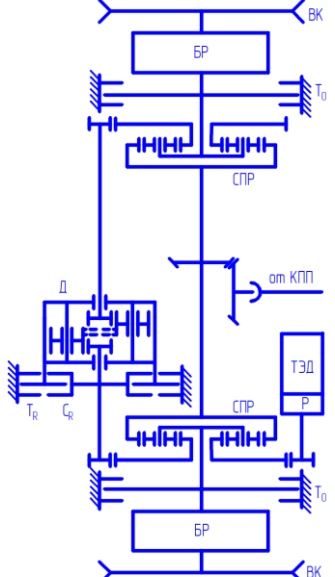
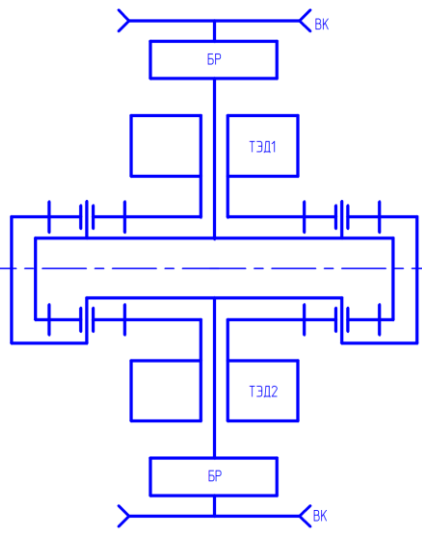
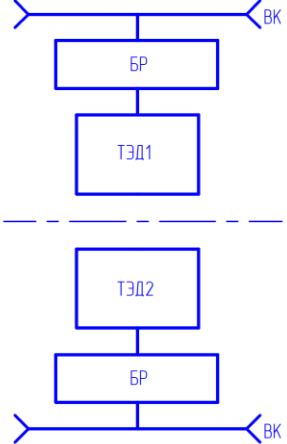
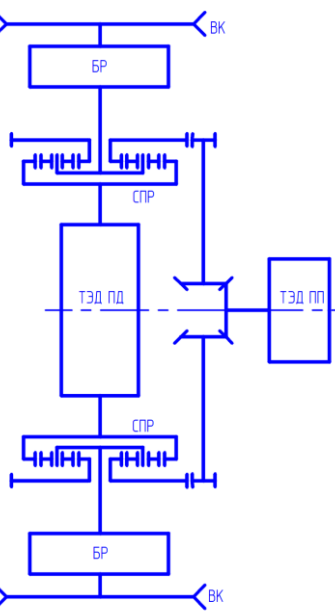
6.3.1.2. Варианты рациональных схем трансмиссий гусеничных БПТМ

Для обеспечения энергоэффективного движения гусеничной беспилотной трелевочной машин, минимизации габаритных размеров требуется определить рациональную схему трансмиссии.

Рекомендации по применению схемных решений организации МПП для различных типов ГМ предложены в докторской диссертации Стадухина А.А. [156]. В ходе проработки конструктивно-компоновочных решений гусеничных БПТМ для машины с пачковым захватом L/B составило 1,61, для машины, оснащенной манипулятором и самозажимным коником 1,14.

В Таблице 29 представлены возможные варианты рациональных схем трансмиссий гусеничных БПТМ.

Варианты рациональных схем трансмиссий гусеничных БПТМ

Дифференциальный привод ведущих колес	Раздельный привод на прямолинейное движение и поворот	Совместный привод на прямолинейное движение и поворот
		
Индивидуальный привод 		БР – бортовой редуктор; СПР – суммирующий планетарный ряд; ТЭД – тяговый электродвигатель; Д - дифференциал; ПП – привод поворота; ПД – прямолинейное движение.

6.3.2. Моделирование движения колесной беспилотной трелевочной машины

В результате проведенных теоретических исследований колесной СБПТМ в процессе моделирования в пакете программ MATLAB Simulink было установлено, что траектория движения колесной СБПТМ с пачкой деревьев 25 м (Рис. 6.47а) при заданном управляющем воздействии (Рис. 6.48) и заданной скорости укладывается в заданный «коридор волока» (Рис. 5.1).

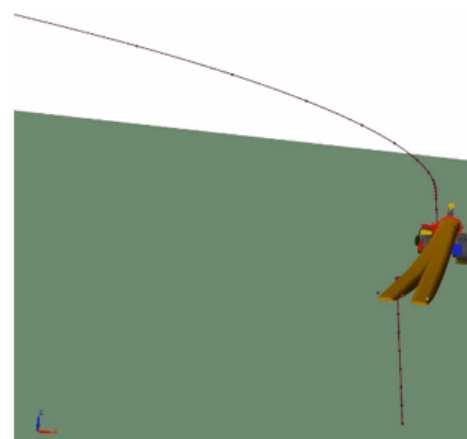
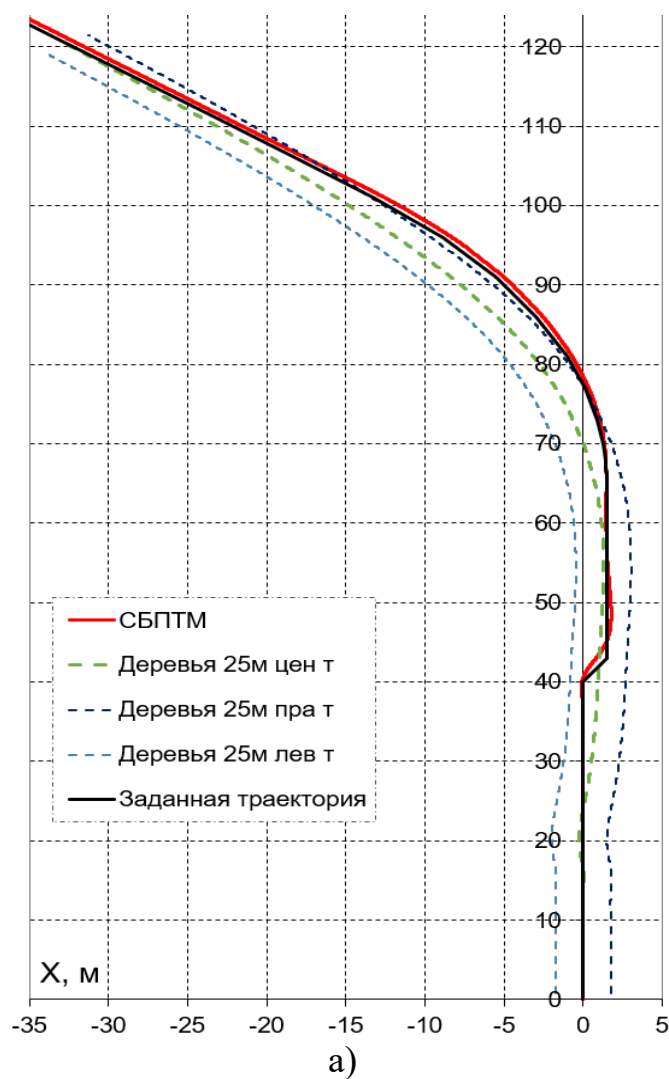
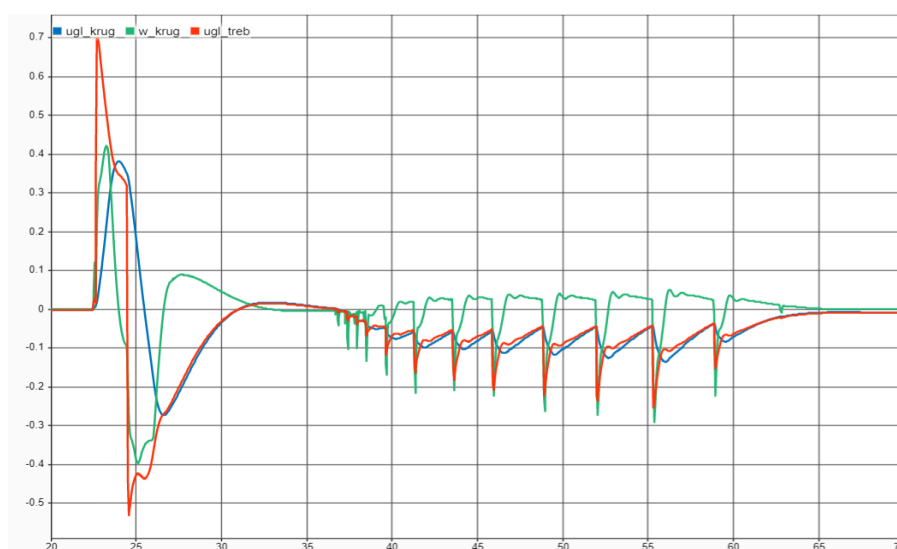


Рис. 6.47. Траектория движения СБПТМ и фрагменты моделирования:
 а - траектория движения колесной СБПТМ с пачкой деревьев 25 м; б –
 фрагмент моделирования движения колесной СБПТМ вид сзади; б – вид в плане



Значения угловых скоростей секций и момента в узле сочленения в установившемся режиме составляют $\omega = 0,397$ 1/с и $M_{yc} = 2200$ Нм.

6.3.2.1. Анализ вертикальных реакций на колёсах беспилотной трелевочной машины с пачковым захватом

С применением методов имитационного математического моделирования были проведены виртуальные эксперименты, позволившие установить закономерности изменения суммарных нагрузок на мосты БПТМ с пачковым захватом при транспортировке пачек различного объёма (Рис. 6.49).

Результаты моделирования показали, что при объёме пачки 10 м^3 нагрузка на задний мост достигала 215 кН, что на 23% превышает допустимую грузоподъёмность шин. На основе численного анализа установлено, что нормативная нагрузка на задние колёса БПТМ (100 кН) обеспечивается только при транспортировке пачки объёмом 8 м^3 .

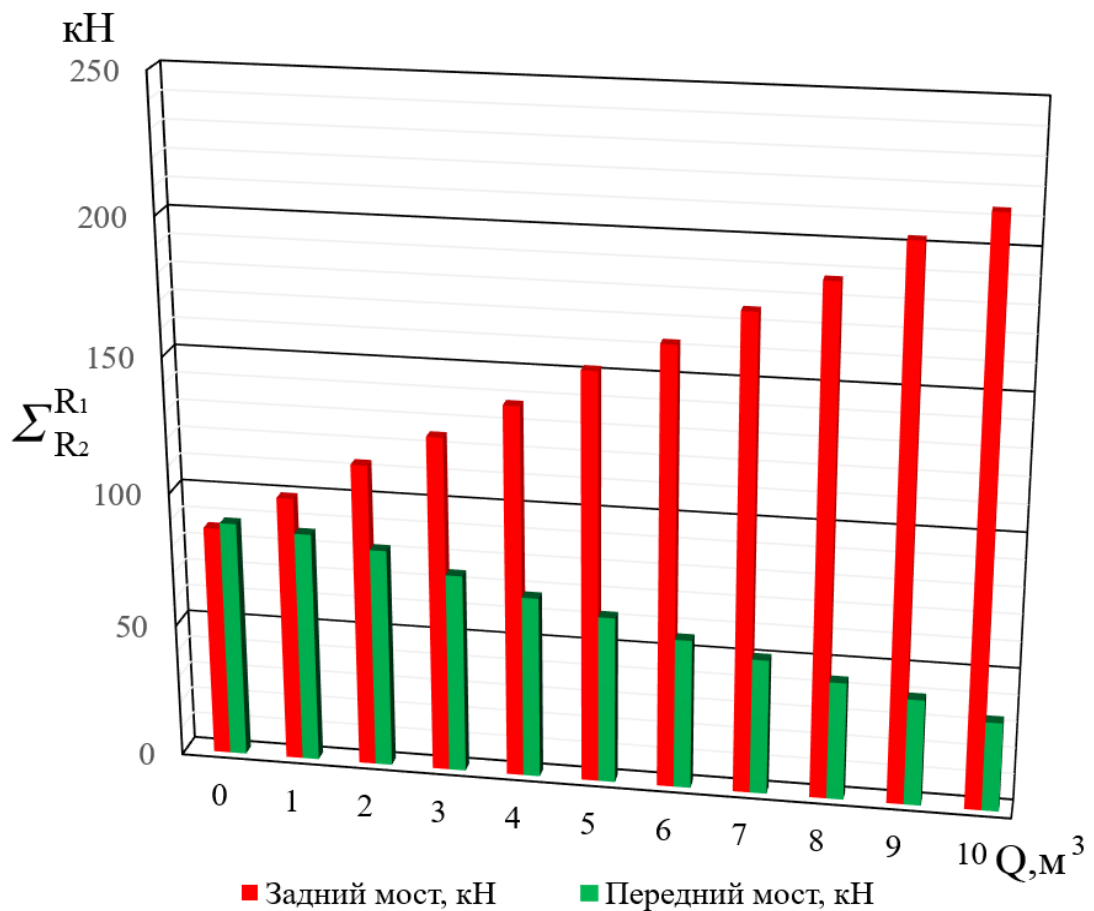


Рис. 6.49. Изменение нагрузок на оси БПТМ с пачковым захватом при транспортировке пачек различного объёма

Имитационное моделирование подтвердило существенное перераспределение вертикальных реакций на передних колёсах БПТМ с пачковым захватом в условиях поворота, что критически влияет на её устойчивость и управляемость. В частности, при углах поворота $25-35^\circ$ и объёме пачки $9-9,5 \text{ м}^3$ наблюдалась потеря поперечной устойчивости, сопровождающаяся отрывом одного из передних колёс от опорной поверхности. Данные результаты указывают на необходимость ограничения размера трелюемых пачек.

Расчёты также продемонстрировали, что при трелевке пачек объёмом $6,5-8 \text{ м}^3$ поперечная устойчивость БПТМ сохраняется при движении по ОП типа сухой грунт, а запас тяги по сцеплению остаётся значительным.

6.3.3. Техническое оснащение беспилотных машин для трелевки заранее подготовленных пачек деревьев

В ходе проведения имитационного математического моделирования рассматривались варианты БПТМ с разным техническим оснащением трелевочного оборудования.

В состав оборудования БПТМ для трелевки предварительно собранных пачек деревьев входят: пачковый захват, стрела, лебедка и толкатель со щитом.

Пачковый захват (Рис. 6.50) используется для сжатия комлевой части пачки и её фиксации во время перемещения.

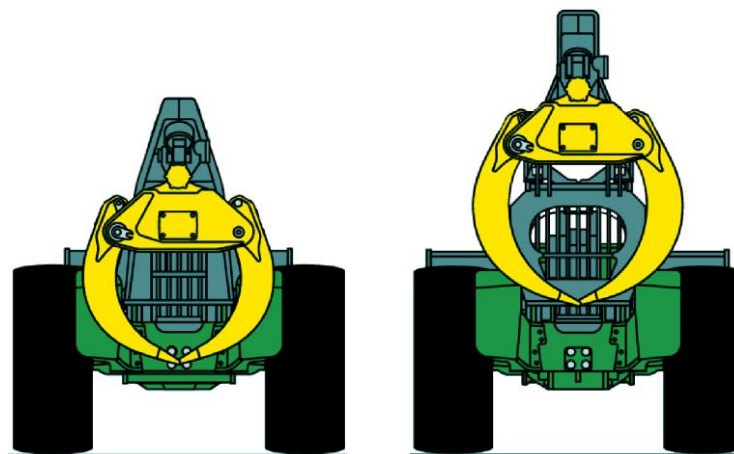


Рис. 6.50. Пачковый захват

Конструкция включает: траверсу; один или два гидроцилиндра; две челюсти; подвесной механизм; синхронизатор раскрытия челюстей.

В некоторых моделях также предусмотрено поворотное устройство для регулировки положения захвата по вертикальной оси. Траверса служит основой, объединяющей все компоненты, а тяги синхронизатора обеспечивают согласованность работы. Рациональные кинематические схемы захватов возможных к применению на БПТМ представлены на Рис. 6.51.

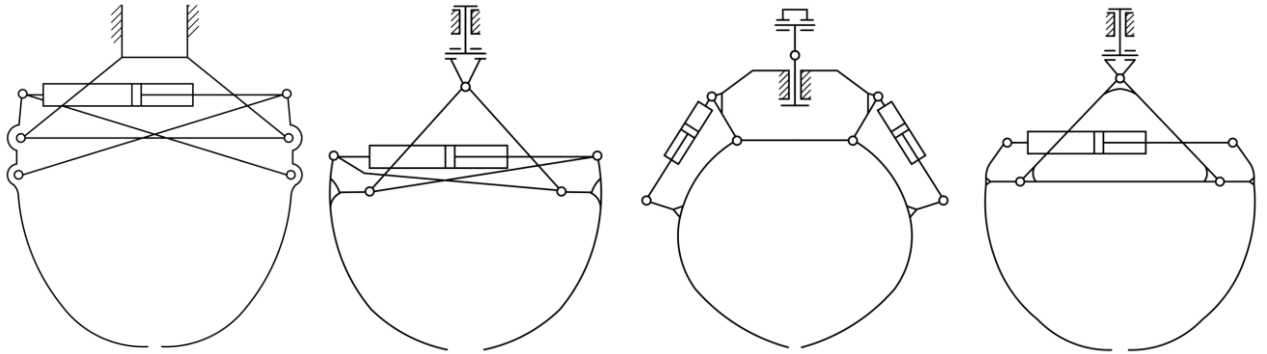


Рис. 6.51 – Кинематические схемы захватов

На БПТМ желательна установка захвата с управляемой подвеской, позволяющей вращать захват вокруг вертикальной оси, что упрощает его наведение на пачку.

Стрела служит для перемещения захвата: опускания и подъема, а также подачи вперед и назад после захвата пачки (Рис. 6.52).

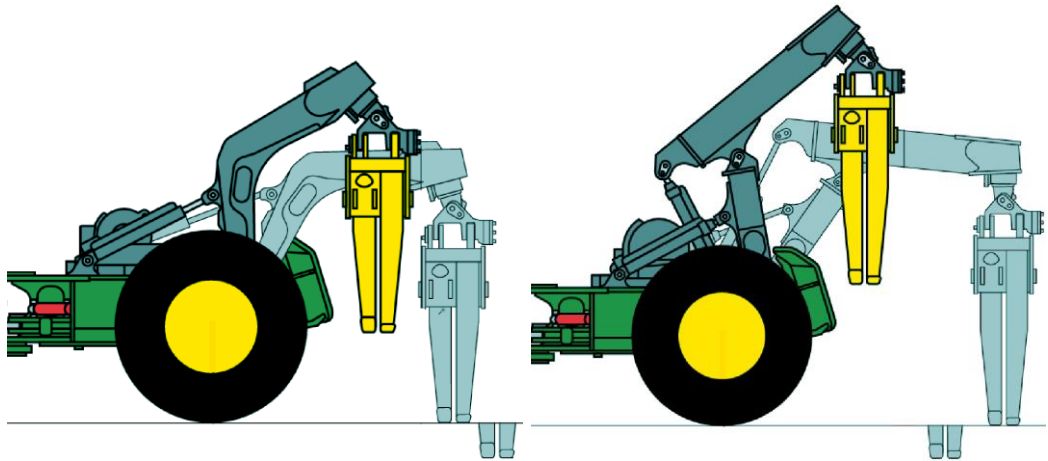


Рис. 6.52. Кинематика стрелы захвата

Стрелы классифицируются по:

- количеству звеньев;
- форме конструкции;
- числу и расположению гидроцилиндров;
- траектории движения точки подвеса захвата (точка М).

Рациональные конструктивные варианты стрел, возможных к применению на БПТМ показаны в Таблице 30.

Таблица 30.

Кинематические схемы стрел БПТМ

Основной вариант	Возможные модификации	Траектория точки подвеса захвата

Выделяют пять основных типов стрел.

Однорычажная стрела – простейшая конструкция с одним подвижным звеном (Г-образным, ломаным или дугообразным).

Это механизм с одной степенью свободы, обычно приводимый в действие четырех- или шестизвенным механизмом.

Траектория подвеса описывается дугой окружности:

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad (6.1)$$

где R – расстояние от точки подвеса.

Недостаток – сложность точного наведения из-за дугообразного движения.

Четырехзвенная стрела – шарнирный механизм, в котором одно из звеньев (CD) является гидроцилиндром. Это система с двумя степенями свободы, обеспечивающая замкнутую траекторию движения подвеса. Такая конструкция облегчает наведение, позволяет регулировать высоту подъема без изменения вылета.

Лебедки на трелевочных машинах используются для:

- фиксации пачки при транспортировке;
- подтягивания пустого захвата к стреле для предотвращения раскачивания.

Толкатель предназначен для выравнивания комлей деревьев в пачках, находящихся на лесосеке или погрузочной площадке (Рис. 6.53). Также он применяется для устранения препятствий на трелёвочном волокне.

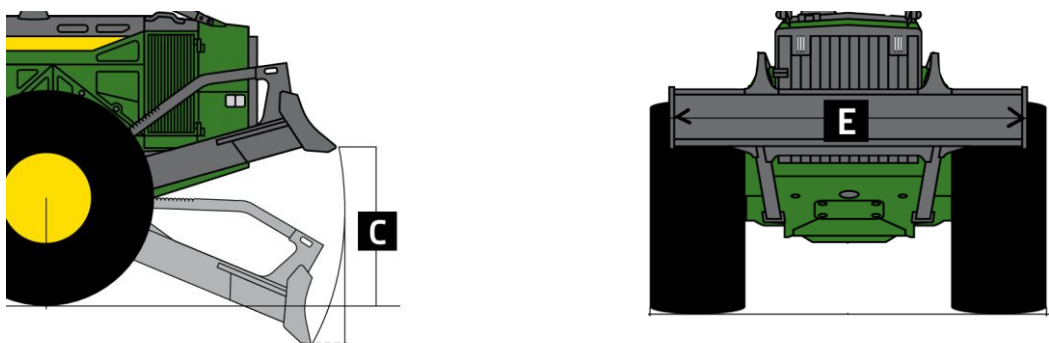


Рис. 6.53. Параметры толкателей

Некоторые трелёвочные машины оснащены трелёвочным щитом, закреплённым на задней полураме. Этот щит помогает выравнивать комли деревьев. Однако при формировании пачки с помощью захвата выступающие комли могут задевать нижний край щита при подъёме. Это приводит либо к обламыванию комля зацепившегося дерева, либо к повреждению захвата или стрелы.

6.4. Выводы по Главе 6

Установлено, что гусеничные БПТМ, оснащенные самозажимным коником с манипулятором или пачковым захватом, теряют подвижность при преодолении вертикального уступа высотой 0,8 м из-за геометрических ограничений конструкции. Максимальный угол подъема, который способна преодолеть гусеничная БПТМ с самозажимным коником и манипулятором, а также модель с пачковым захватом, составляет 25° .

На основе известных зависимостей между моментами, передаваемыми на ведущие колеса, и их частотами вращения определены требуемые механические характеристики для различных вариантов механизмов передачи и поворота (МПП). Наибольшая эффективность управления поворотом достигнута при применении двухпоточного дифференциального механизма поворота с гидрообъемной передачей (ГОП) в параллельном потоке мощности.

Исследования показали, что для гусеничных БПТМ, работающих на лесосеке, повышение управляемости может быть обеспечено заменой традиционных механизмов поворота типа «бортовой фрикцион» на планетарные механизмы с тормозами, управляемыми гидроприводом.

Установлено, что для перспективных гусеничных лесозаготовительных машин наиболее рациональной схемой привода ведущих колес, обеспечивающей максимальную маневренность, является гибридный МПП, в котором параллельный поток мощности реализуется через электродвигатель. Индивидуальный привод ведущих колес рационально применять в случае гусеничной БПТМ с малым $L/B = [1...1,2]$.

Установлено, что у четырехкатковой гусеничной БПТМ с МП симметричного типа оснащенной самозажимным коником и манипулятором затрачиваемая энергия на движение по маршруту волока с пачкой 8 м^3 будет минимальна (13915,9 кДж) из всех рассматриваемых вариантов гусеничных БПТМ.

Установлено, что при транспортировке пачки объемом 10 м^3 нагрузка на задний мост СБПТМ достигала 215 кН, что на 23% превышает допустимую

грузоподъёмность шин. При углах поворота 25-35° и объёме пачки 9–9,5 м³ наблюдалась потеря поперечной устойчивости, сопровождающаяся отрывом одного из передних колёс от опорной поверхности.

В результате проведенных теоретических исследований колесной СБПТМ в процессе моделирования было установлено, что траектория движения колесной СБПТМ с пачкой деревьев 25 м при заданном управляющем воздействии и заданной скорости укладывается в заданный «коридор волока».

Установлено, что рассматриваемые модели гусеничных БПТМ демонстрируют различную проходимость при преодолении препятствий виртуальной лесосеки. Машина с пачковым захватом способна преодолевать поваленные деревья высотой до 0,6 м, тогда как модификация с самозажимным коником ограничена препятствиями до 0,5 м. Аналогичное соотношение наблюдается при преодолении пней: 0,7 м для машины с пачковым захватом против 0,5 м для машины с коником. Максимальная высота преодолеваемого вертикального уступа составляет 0,7 м при скорости 3,6 км/ч, при этом увеличение скорости до 7,2 км/ч приводит к критическим перегрузкам ходовой системы. Обе модификации успешно преодолевают контрэскарпы высотой 0,8 м, однако у варианта с пачковым захватом фиксируются 6-кратные перегрузки опорных катков. При движении по косогору предельный угол составляет 15°, при этом модель с самозажимным коником демонстрирует на 23% меньшие нагрузки на ходовую систему, что свидетельствует о ее лучшей адаптации к работе на наклонных поверхностях.

Установлено, что для эффективной трелевки заранее подготовленных пачек деревьев наиболее рациональным является комплексное техническое оснащение, включающее пачковый захват с управляемой подвеской, обеспечивающей вращение вокруг вертикальной оси для точного позиционирования, четырехзвенную стрелу с регулируемой траекторией подвеса, позволяющую оптимально манипулировать грузом, и толкатель для выравнивания комлевой части пачки и устранения препятствий на трелевочном волоке.

Глава 7. Техничко-экономическое исследование коллаборативной технологии заготовки древесины

В современных условиях лесозаготовительная отрасль активно развивается за счет внедрения энергосберегающих и роботизированных технологий, направленных на повышение производительности, безопасности и экологичности производства [179]. Проведенные исследования сравнивают традиционные и коллаборативные (беспилотные) технологии заготовки древесины, оценивая их технико-экономическую эффективность. Методология исследования включала анализ производительности лесосечных машин на основе хронометражных данных, технических характеристик и организационных условий, использование аналитических функционалов, учитывающих эксплуатационные, экономические и технологические показатели, а также метод сплошного перебора для оптимизации состава парка машин. Особое внимание уделено расчету экономического эффекта от внедрения беспилотных технологий, включая снижение затрат на ГСМ, зарплату операторов и энергопотребление.

7.1. Расчет экономического эффекта от внедрения беспилотных технологий

Ключевые результаты исследования демонстрируют ряд значительных преимуществ БПТМ. Так, порожняя БПТМ в 2 раза может быстрее двигаться по сравнению с традиционными машинами, что сокращает время цикла трелевки и позволяет повысить производительность в среднем на 20%.

Экономический эффект (Рис. 7.2) проявляется в исключении затрат на зарплату оператора (до 3,1 млн руб. в год), снижении энергопотребления климатических систем на 72 кВт·ч/сутки (экономия до 1080 руб./день), оптимизации расхода топлива (экономия 15750 л/год или 945 тыс. руб./год) и

уменьшении металлоемкости (экономия 3600 л дизеля/год или 216 тыс. руб./год). Однако внедрение БПТМ требует значительных первоначальных вложений: к примеру, стоимость оборудования для беспилотного управления скиддером составляет порядка 105 тыс. долл. (Рис. 7.1), но при этом снижаются затраты за счет уменьшения металлоемкости и необходимости изготовления кабины оператора (Приложение).

Так за три года экономия от внедрения одной БПТМ при рабочей смене 12 часов будет составлять чуть больше 10,5 млн. рублей (Рис. 7.2).

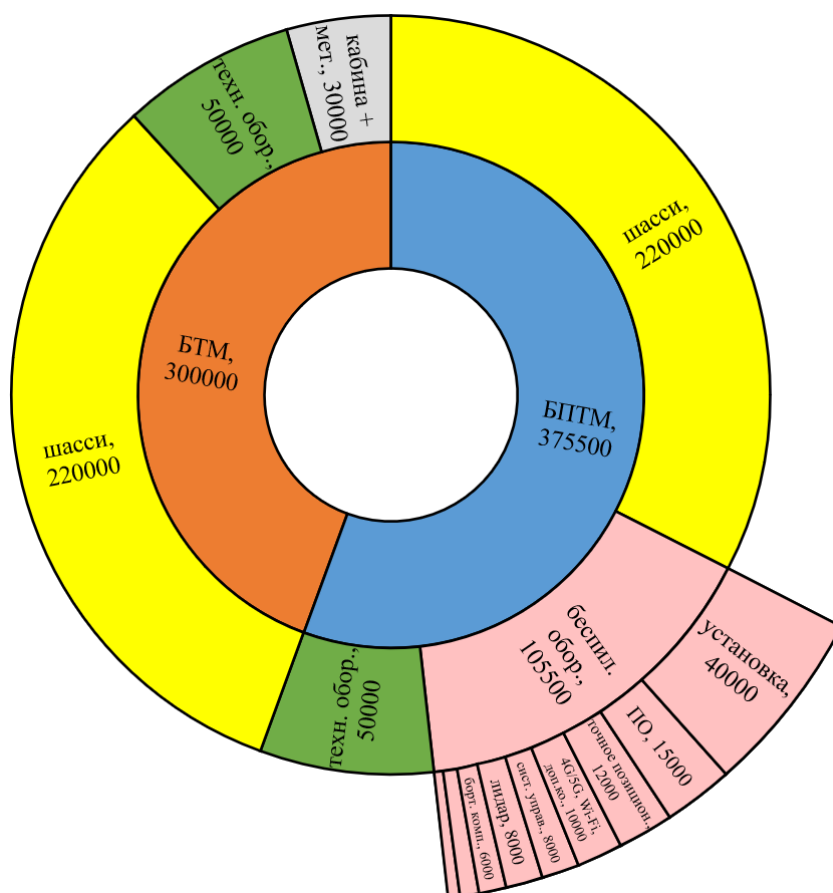


Рис. 7.1. Сравнение стоимости бесчokerной трелевочной машины (скиддера) с БПТМ (долл.)

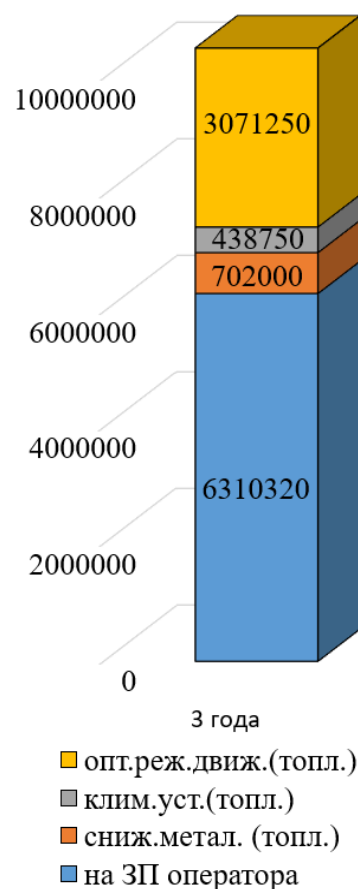


Рис. 7.2. Экономия внедрения БПТМ (руб.)

За год энергоэффективность БПТМ составляет более 86 тыс. кВт*ч, что позволяет снизить выбросы CO₂ до 57 тонн в год (Рис. 7.3, 7.4).

Для крупных лесозаготовительных предприятий внедрение БПТМ экономически оправдано благодаря снижению эксплуатационных затрат и значительному росту производительности, в то время как для малых предприятий традиционные технологии могут оставаться более выгодными из-

за высоких первоначальных затрат. Перспективы развития коллаборативных технологий в лесозаготовке связаны с дальнейшим совершенствованием технических решений и снижением стоимости оборудования внешней и внутренней сенсорной сети машины, что делает их более доступными для широкого круга предприятий.

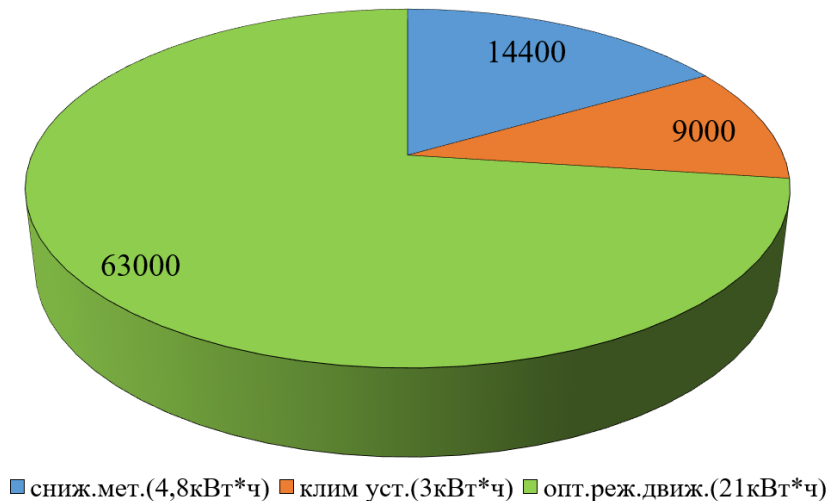


Рис. 7.3. Энергоэффективность за 1 год (кВт*ч)

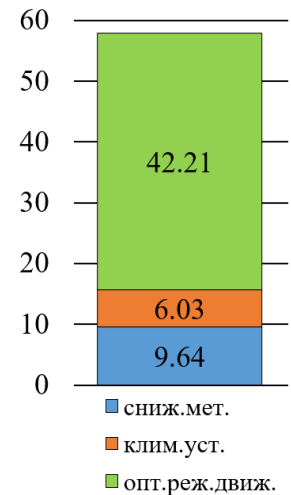


Рис. 7.4. Снижение выбросов CO₂ (тонн г.)

Экономический эффект от внедрения коллаборативной технологии достигается за счет: уменьшения затрат связанных с заработной платой оператора трелевочной машины; увеличении скорости движения БПТМ в порожнем состоянии и исключения простоев связанных с перерывами на физиологические потребности человека, что приводит к увеличению производительности машины в смену; повышения энергоэффективности БПТМ за счет того, что рационально расходуется энергия при движении в порожнем и груженном состоянии по маршруту волока, а также снижении энергопотребления климатических систем и уменьшения металлоёмкости, что приводит к уменьшению на 18% затрат связанных с ГСМ.

На начальном этапе внедрения коллаборативной технологии заготовки древесины необходимо будет своевременно повышать квалификацию операторов и обслуживающего персонала БПТМ в эксплуатации и обслуживании систем распознавания условий движения и управления движением, которые устанавливаются на машины. В динамично развивающемся

рынке электроники в области беспилотных систем необходимо определиться с качественным и приемлемым по стоимости оборудованием, а также его надежными поставщиками. Все это на начальном этапе потребует определенных дополнительных экономических вливаний, которые в последующем окупятся.

7.2. Выводы по Главе 7

1. Экономия энергии на климатической системе лесозаготовительной машины в размере 72 кВт·ч за сутки (согласно проведенным расчетам) приводит к:

- экономии затрат: до 1080 рублей в день (дизель стоимостью ≈ 60 р.);
- снижению выбросов CO₂: до 17,6 тонн в год (дизель);
- улучшению экологических показателей и повышению конкурентоспособности.

Расчеты показывают, что даже небольшая экономия энергии на одной машине может иметь значительный эффект при масштабировании на парк лесозаготовительной техники или длительный период эксплуатации.

2. Снижение металлоёмкости (1 тонна) приводит к:

- снижению энергопотребления: на 4,8 кВт·ч;
- экономии энергии за год: 14400 кВт·ч;
- экономии топлива за год: 3600 литров дизеля;
- экономии в денежном выражении: 216000 руб/год.

3. Стоимость оборудования для беспилотной работы трелевочной машины составляет:

- Минимальная стоимость: около 25 000 – 30 000 \$;
- Средняя стоимость: 40 000 – 60 000 \$;
- Высокотехнологичное решение: до 80 000 \$ и выше.

4. Ориентировочная стоимость переоборудования трелевочной машины в беспилотную может составлять 35-50% от стоимости базовой трелевочной машины.

5. Беспилотная трелевочная машина, движущаяся в порожнем состоянии в 2 раза быстрее, может увеличить производительность на ~20% (с 98 до 118 м³ за смену).

6. Благодаря плавному ускорению, торможению и адаптации к условиям местности, машина станет энергоэффективнее за счет:

- снижения энергопотребления: на 21 кВт·ч;
- экономии энергии за год: 63 000 кВт·ч;
- экономии топлива за год: 15750 литров дизеля;
- экономии в денежном выражении: 945000 руб/год.

Дополнительные преимущества заключаются в снижении износа оборудования за счет плавного управления, что уменьшает нагрузку на двигатель, трансмиссию и другие узлы. Это позволяет продлить срок службы машины.

Снижение выбросов CO₂: экономия 10 500 литров дизеля эквивалентна снижению выбросов CO₂ на $15750 * 2,68 \text{ кг/л} = 42210 \text{ кг CO}_2$ (или 42,21 тонн CO₂).

7. Для небольших лесозаготовительных предприятий обычная трелевочная машина может быть более выгодной из-за низкой начальной стоимости и простоты эксплуатации. Для крупных лесозаготовительных предприятий беспилотная трелевочная машина становится выгодной благодаря снижению эксплуатационных затрат и повышению производительности. В перспективе с развитием технологий и снижением стоимости оборудования для беспилотных машин их использование станет более доступным и экономически оправданным.

Заключение и общие выводы по работе

1) Разработана коллаборативная технология заготовки деревьев и сортиментов 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, позволяющая повысить безопасность труда и энергоэффективность при выполнении операций трелевки и экономическую эффективность лесозаготовок;

2) Созданы имитационные математические модели для анализа движения колесных и гусеничных БПТМ с двумя типами технологического оборудования: с пачковым захватом и самозажимным коником. Разработанные модели применяются для оценки подвижности машин на этапе проектирования. Уравнения динамики формируются с помощью программных комплексов, автоматизированного моделирования систем твердых тел, что позволяет учитывать кинематику и динамику колесного и гусеничного движителей.

3) Верифицированные модели динамики колесной и гусеничной БПТМ с учетом экспериментально определенных параметров дорожно-грунтовых условий и данных, полученных в результате работы контрольно-измерительного оборудования, пригодны для исследования динамики криволинейного движения машин с полупогруженной пачкой деревьев по плотному грунту. Сравнение натурных испытаний и имитационного моделирования показало, что отклонение от расчетной траекторий не превышает 16%, что соответствует допустимой погрешности.

4) Разработаны законы управления движением гусеничных и колесных БПТМ, направленные на повышение безопасности, энергоэффективности и экономической эффективности лесозаготовок. Управление может осуществляться как оператором дистанционно, так и автоматической беспилотной системой.

5) Предложен метод определения оптимальных параметров трансмиссии и технологического оборудования БПТМ с использованием имитационного моделирования на виртуальной лесосеке с заданными дорожно-грунтовыми условиями. Метод включает комплекс вычислительных мероприятий для оценки проходимости машины по микропрофилям пасечных и магистральных волоков на этапе проектирования, что позволяет определить требуемые конструктивные параметры трансмиссии и ходовой системы БПТМ для движения по волоку с максимальной энергоэффективностью. Разработана методика виртуальных испытаний, учитывающая различные режимы движения, скорость и траекторию БПТМ с пачкой деревьев и в порожнем состоянии в соответствии с лесоводственными требованиями к технологическим процессам лесосечных работ

6) Разработан метод математического моделирования движения колесных БПТМ по опорным основаниям трелевочного волока, позволяющий оценивать безопасность и энергоэффективность движения при трелевке деревьев в полупогруженном состоянии и сортиментов на этапе проектирования. Особенность метода заключается в возможности исследования БПТМ с различными конструктивными особенностями трелевочного оборудования. Математическая модель позволяет имитировать поведение БПТМ в реальных условиях эксплуатации, сокращая сроки проектирования, доводочных испытаний и повысить безопасность и энергоэффективность движения по трелевочному волоку. Сравнение результатов имитационного моделирования с натурными экспериментами подтвердило адекватность разработанной математической модели: погрешность по энергетическим и кинематическим показателям криволинейного движения при выполнении маневров «Поворот на пасечном ($R=10\text{м}$) и магистральном ($R=30\text{м}$) волоке» не превышает 11%, при выполнении маневра «Криволинейная траектория» - 13%.

7) Установлено, что применение разработанных законов для обеспечения движения по заданной траектории волока, повышает безопасность и энергоэффективность трелевки. Особенностью разработанных законов управления является автономное движение БПТМ (как порожней, так и с грузом)

без участия оператора. Отклонение от заданной траектории для машины с полупогруженной пачкой деревьев не превышает 12%, а для порожней БПТМ или при транспортировке сортиментов - 10%.

8) 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. Для машин, работающих на лесосеке, рекомендуется замена традиционных бортовых фрикционов на бортовые планетарные механизмы с гидроприводом. Для перспективных гусеничных лесозаготовительных машин рациональной схемой привода ведущих колес для обеспечения максимум возможностей по управлению движением является гибридный МП, в котором в параллельном потоке мощности установлен электродвигатель. Индивидуальный привод ведущих колес рационально применять в случае гусеничной БПТМ с малым $L/B = [1...1,2]$.

9) Установлено, что разработанные законы управления движением беспилотными трелевочными колесными и гусеничными машинами, позволяют повысить экологическую безопасность при выполнении маневров на лесосеке, путем предотвращения выезда за пределы трелевочного волока.

10) Установлено, что коллаборативная технология заготовки древесины с применением БПТМ обеспечивает значительное повышение технико-экономической и экологической эффективности лесозаготовительных работ. Данная технология отличается применением автономных и дистанционно управляемых робототехнических комплексов, что позволяет увеличить производительность на 20% за счёт сокращения времени цикла трелёвки и исключения простоев, связанных с человеческим фактором. Экономический эффект достигается за счёт снижения затрат на заработную плату оператора (до 3,1 млн руб. в год), оптимизации расхода топлива (экономия 15750 л/год), уменьшения энергопотребления (86 тыс. кВт·ч/год) и металлоёмкости конструкции. Дополнительным преимуществом является снижение выбросов CO₂ на 57 тонн в год, что повышает экологическую безопасность производства.

Список сокращений и условных обозначений

Условные обозначения:

- 1) БЛА - беспилотный летательный аппарат;
- 2) БПТМ - беспилотная трелевочная машина;
- 3) БТМ – бесчокерно-трелёвочная машина;
- 4) ВСМ - валочно-сучкорезная машина;
- 5) ВСТМ - валочно-сучкорезно-трелёвочная машина;
- 6) ВПМ - валочно-пакетирующая машина;
- 7) ВТМ - валочно-трелёвочная машина;
- 8) ГОП - гидрообъемная передача;
- 9) ГД - гусеничный движитель;
- 10) ГМ - гусеничная машина;
- 11) ДГУ - дорожно-грунтовые условия;
- 12) ИИ - искусственный интеллект;
- 13) КМ - колесная машина;
- 14) КПД - коэффициент полезного действия;
- 15) ЛЗП - лесозаготовительное предприятие;
- 16) ЛП - лесопогрузчик;
- 17) МП - механизм поворота;
- 18) МПП - механизм передач и поворота;
- 19) ОП - опорная поверхность;
- 20) ОО - опорное основание;
- 21) ОК - опонный каток;
- 22) ПТМ – погрузочно-транспортная машина;
- 23) СМ - система машин;
- 24) СБПТМ - сочлененная беспилотная трелевочная машина.

Список литературы

1. Авотин Е.В., Добрецов Р.Ю. Метод расчета энергозатрат на движение колесной транспортной машины // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. № 4 (159). С. 168-172.
2. Аблонский Е.И. Трелевочные тракторы / Е.И. Аблонский [и др.]. М.: Лесная промышленность, 1972. 224 с.
3. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
4. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Проблемы представления характеристик грунтов в математических моделях движения колесных машин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2005. № 1 (58). С. 44-53.
5. Агейкин Я.С., Вольская Н.С., Чичекин И.В. Проходимость автомобиля. М., 2010. 350 с.
6. Александров В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин. М.: Экология, 1995. 258 с.
7. Алябьев А.Ф., Калинин С.Ю. Модель взаимодействия гусеницы трактора с грунтом // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 2. С. 173-178.
8. Алябьев А.Ф., Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Котов А.А. Влияние шага грунтозацепов на тяговые свойства гусеничного движителя // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 1 (124). С. 138-145.
9. Алябьев В.И. Математическое моделирование и оптимизация производственных процессов на лесозаготовках. М.: МЛТИ, 1978. 79 с.
10. Алябьев В.И. Оптимизация производственных процессов на лесозаготовках. М.: Лесная промышленность, 1977. 231 с.
11. Анилович В.Я. Водолажченко Ю.Т. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов. М.: Машиностроение, 1976. 452 с.

12. Андронов А.В. Повышение эффективности трелевки путем учета энергонасыщенности колесных сортиментоподборщиков: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб, 2015. 141 с.
13. Анисимов Г.М., Кочнев А.М. Испытания лесосечных машин. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 488с.
14. Анисимов Г.М., Жендаев С.Г., Жуков А.В., Извеков В.С., Котиков В.М., Никифоров В.М., Слодкевич Я.В. Лесные машины. М.: Лесная промышленность, 1989. 511с.
15. Анисимов Г.М., Котиков В.М., Куликов М.И., Шоль Н.Р. Лесотранспортные машины. Ухта: УГТУ 2006. 449с.
16. Антонов Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
17. Арутюнян А.Ю., Бурмистрова О.Н., Бурмистров Д.В. К вопросу проезжаемости трелевочных волоков // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-7. С. 1295-1298.
18. Афанасьев Б.А., Жеглов Л.Ф., Зузов В.Н. [и др.]. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов: В 3 т., Т.2. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. 528 с: ил с.
19. Бабков В.Ф., Безрук М.В. Основы грунтоведения и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1976. 328 с.
20. Бабков В.Ф., Бируля А.К., Сидеико В.М. Проходимость колёсных машин по грунту. М.: Автотрансиздат, 1959. 189 с.
21. Баженов Е.Е., Буйначев С.К., Кручинин И.Н. Теория сочлененных транспортных и технологических систем: монография. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 256 с.
22. Балин Н.М., Вольский С.Г. Определение физико-механических свойств снежной целины при испытаниях транспортных средств // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1979. Вып. 288. С. 51-58.
23. Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Кравец В.Н. Проходимость автомобиля. Нижний Новгород: НГТУ, 1996. 200 с.

24. Барахтанов Л.В. Повышение проходимости гусеничных машин по снегу: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Горький, 1988. 342 с.
25. Бартенев И.М., Драпалюк М.В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехнический журнал. 2012. № 1 (5). С. 61-66.
26. Батанов А.Ф., Грицынин С.Н., Муркин С.В. Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций, разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана // Безопасность в техносфере. 2007. № 1. С. 54-59.
27. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 727 с.
28. Бекетов С.А. Теория управляемого движения гусеничных машин. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. 125 с.
29. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность машина: пер. с англ. под ред. В.В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1973. 520 с.
30. Беляков В.В. Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М., 1992. 189 с.
31. Беляков В.В., Молев Ю.И., Вахидов У.Ш. [и др.]. Проектирование наземных транспортно-технологических машин и комплексов: учебник под. ред. В.В. Белякова. Москва: КНОРУС, 2021. 450 с.
32. Беляков В.В., Беляев А.М., Вахидов У.Ш. [и др.]. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3(100). С. 145–174.
33. Беляков В.В. История робототехнических систем и комплексов / Беляков В.В. [и др.]. учебник. М., 2024. 542 с.
34. Болтинский В.Н. Теория, конструкция и расчет тракторных и автомобильных двигателей. М., 1962. 391 с.
35. Бузунов Н.В. Метод разработки законов управления нагрузателем рулевого колеса при отсутствии «жесткой» связи в системе управления поворотом

- колесных машин // Диссертация ... дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М., 2017. 186 с.
36. Бурмистров Д.В., Арутюнян А.Ю., Бурмистрова О.Н. Проходимость комплексных трелевочно-транспортных систем на трелевочных волоках // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-7. С. 1304-1307.
37. Валяжонков В.Д., Никифорова А.И., Андронов А.В., Хахина А.М. и др. Преимущества и недостатки повышения рабочих скоростей лесных машин // Проблемно-ориентированные исследования процессов инновационного развития региона. Материалы РНПК. Петрозаводск. 2013. С. 23-24.
38. Венцель Е.С. Теория вероятности. М.: Физико-математическая литература. 1962. 564 с.
39. Виногоров Г.К. Лесосечные работы. М.: Лесная промышленность, 1981. 272 с.
40. Водяник И.И. Уплотнение почвы движителями сельскохозяйственных машин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1983. № 5. С. 19-22.
41. Вольская Н.С. Влияние грунтовой поверхности и параметров многоосных колесных машин на критерии их эффективности при криволинейном движении // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 2 (15). С. 18-26.
42. Вольская Н.С. Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. М., 2008. 320 с.
43. Вольская Н.С., Агейкин Я.С., Чичекин И.В., Ширяев К.Н. Методика определения глубины колеи под колёсами многоосной машины с учётом физико-механического состояния грунта // Журнал автомобильных инженеров. 2013. № 2 (79). С. 22-25.
44. Вольская Н.С., Левенков Я.Ю., Чичекин И.В., Захаров А.Ю. Новые методы расчета проходимости колесных машин на стадии проектирования // Инженерный вестник. 2016. № 12. С. 16.
45. Вольская Н.С., Ширяев К.Н. Влияние цикличности нагружения грунта на его физико-механические свойства в расчетах на проходимость колесных машин // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 4 (25). С. 2-8.

46. Воскобойников И.В., Еремеев Н.С. Концепция построения системы информационно-аналитического обеспечения лесопромышленного комплекса // Лесной вестник (1997-2002). 2000. № 3. С. 44-47.
47. Воскобойников И.В., Кондратюк В.А., Крылов В.М. [и др.]. Многооперационные лесные машины. Т.1. Москва: МГУЛ. 2013. 430 с.
48. Воскобойников И.В., Кондратюк В.А., Крылов В.М. [и др.]. Многооперационные лесные машины. Т.2. Москва: МГУЛ. 2013. 496 с.
49. Галактионов О.Н. Методика оценки энергозатрат при движении форвардера // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Т. 9, № 1. С. 10-12.
50. Гастев Б.Г. Вынужденные колебания связанной системы (пакет хлыстов и подвижной состав лесовозных дорог) // Научно-техническая информация ЛЛТИ. 1957. № 5.
51. Галактионов О.Н., Суханов Ю.В., Васильев А.С. Применение системного анализа техники и технологий лесовосстановления для выявления перспектив использования роботизированных лесопосадочных машин // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6 (90). С. 834-844.
52. Герасимов Ю.Ю., Сюнев В.С. Лесосечные машины для рубок ухода: комплексная система принятия решений. Петрозаводск: ПетрГУ, 1998. 235 с.
53. Гоберман В.А., Гоберман Л.А. Прикладные расчеты по теории и проектированию тягово-транспортных систем и процессов. М.: МГУЛ, 2006. Т.1. 312 с.
54. Горелов В.А., Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А. Метод определения характеристик индивидуального тягового электропривода двухзвенной гусеничной машины на этапе проектирования // Труды НГТУ им. РЕ. Алексеева. 2019. № 3(126). С. 120-134.
55. Горобцов А.С., Карцов С.К., Кушвид Р.П. Комплекс ФРУНД - инструмент исследования динамики автомобиля // Автомобильная промышленность. 2005. №2. С. 32-33.

56. Горобцов А.С., Солоденков С.В. Расчётные задачи динамики систем твёрдых и упругих тел в программном комплексе ФРУНД // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 4. С. 31-38.
57. Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб: ЛТА, 2006. 236 с.
58. Григорьев И.В. Влияние способа трелевки на эксплуатационную эффективность трелевочного трактора: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб, 2000. 143 с.
59. Григорьев И.В., Былев А.Б., Хахина А.М., Никифорова А.И. Математическая модель уплотняющего воздействия динамики поворота лесозаготовительной машины на боковые полосы трелевочного волока // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 8-1 (129). С. 72.
60. Григорьев И.В., Макуев В.А., Шапиро В.Я., Рудов М.Е. и др. Расчет показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелевке пачки хлыстов // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2013. № 2. С. 112-118.
61. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Хахина А.М. Новые технические решения для повышения эффективности лесосечных работ // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2013. № 1 (93). С. 46-49.
62. Григорьев И.В., Шапиро В.Я., Рудов М.Е., Никифорова А.И. Математическая модель уплотнения почвы комлями пачки хлыстов при их трелевке // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 6 (127). С. 65-69.
63. Гуров С.В. Планирование и статистическая обработка результатов экспериментов. СПб: ЛТА, 1994. 31 с.
64. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е., Бочаров Н.Ф., Ксенович И.П., Солонский А.С. Тракторы: теория. М., 1988. 324 с.
65. Гуськов В.В., Опейко А.Ф. Теория поворота гусеничных машин. М., 1984. 168 с.

- 66.Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Газизов А.М. Пути улучшения управляемости лесных и транспортных гусеничных машин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (43). С. 97-106.
- 67.Добрецов Р.Ю., Иванов С.А. Сравнительная оценка механизмов поворота транспортных гусеничных машин // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практ. конференции с междунар. участием. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 166 с. С. 77-79.
- 68.Добрецов Р.Ю., Поршнев Г.П. К определению параметров энергоэффективности механизма поворота шасси транспортных и технологических гусеничных машин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2015. №1 С. 42-55
69. Добрецов Р.Ю., Семёнов А.Г. О снижении перепадов нормальной нагрузки на опорное основание при качении гусеничного движителя // Экология и промышленность России. 2012. № 5. С. 46-49.
- 70.Евсеев К.Б. Законы управления криволинейным движением полуприцепного гусеничного поезда для внедорожных перевозок грузов // Тракторы и сельхоз машины. 2022. №4. С. 263-276.
- 71.Евсеев К.Б. Методы разработки высокоподвижных гусеничных поездов для внедорожных контейнерных перевозок: дис. ... д-ра техн. наук: 2.5.11. Москва. 2022. 357 с.
- 72.Егоров Л.И. Исследование некоторых вопросов управляемости гусеничных лесосечных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.420. Москва. 1972. 187 с.
- 73.Ерхов А.В. Влияние параметров подвески гусеничного лесопромышленного трактора на динамику и энергопотери при движении по неровному пути: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Москва. 1988. 221 с.
- 74.Жуков А.В. Проектирование лесопромышленного оборудования. Мн.: Выш. шк., 1990. 312 с.
- 75.Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1975. 448 с.

76. Забавников Н.А., Сологуб П.С., Назаренко Б.П., Наумов В.Н., Рождественский Ю.Л., Машков К.Ю. Исследование бортового поворота колесной транспортной машины методом испытаний одиночного колеса // Тракторы и сельхозмашины. 1972. № 1. С. 12–14.
77. Забавников Н.А., Кемурджиан А.Л., Рождественский Ю.Л. [и др.] Машины, приборы, стенды. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, Вып. 4. 1974. С. 94.
78. Занегин Л.А., Воскобойников И.В., Кондратюк В.А. [и др.] Однооперационные лесные машины. Т.1. М.: МГУЛ, 2009. 501 с.
79. Занегин Л.А., Воскобойников И.В., Кондратюк В.А. [и др.] Однооперационные лесные машины Т.2. М.: МГУЛ, 2009. 454 с.
80. Зайчик М.И., Орлов С.Ф. Проектирование и расчёт специальных лесных машин. М.: Лесная промышленность, 1976. 208 с.
81. Зайчик М.И. Характеристика поворотливости гусеничных лесосечных машин и баланс мощности. // Труды МЛТИ. 1970. вып.25.
82. Запруднов В.И., Карпачев С.П., Быковский М.А. Технологии и технические средства процессов лесосечных работ // Лесной вестник. 2017. Т. 21. № 1. С. 108-117. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-108-117
83. Закревский П.Б. Изменение объемного веса ствола и кроны растущих деревьев по высоте // Труды ЦНИИМЭ, Химки, 1972, №123, с. 92.
84. Калинин А.В., Носков В.П., Рубцов И.В. Средства, обеспечивающие автономное движение наземных РТК // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 11 (136). С.71-81.
85. Каляев И.А., Капустян С.Г. Групповое управление роботами: проблемы, решения // Известия высших учебных заведений. - Машиностроение. 2011. № 13. С.7-12.
86. Карцов С. К., Горбцов А. С., Плетнев А. Е., Поляков Ю. А. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей // монография. М.: Машиностроение, 2011. 463 с.

87. Камусин А.А., Борисов В.А., Акинин Д.В., Казанчеева Н.И. Некоторые вопросы, связанные с трелёвкой хлыстов // Resources and Technology 16 (1): 52-67, 2013 ISSN 2307-0048
88. Капранов И.В. Колебания гусеничного трактора и нагрузки в элементах его ходовой части. М.: МЛТИ, 1987. 92 с.
89. Капустян С.Г. Методы и алгоритмы коллективного управления роботами при их групповом применении диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ГНУ Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону, 2008.
90. Кацыгин В.В. Рациональные параметры энергонасыщенных тракторов и машино-тракторных агрегатов. / В.В. Кацыгин [и др.] под общей ред. В.В. Кацыгина. Минск: Урожай, 1976. 159 с.
91. Клубничкин В.Е. Коллаборативная технология трелевки древесины // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор А.А. Платонов. Воронеж, 2022. С. 26-31.
92. Клубничкин В.Е. Формирование облика гусеничных беспилотных трелевочных машин // Материалы XX Международной научно-технической конференции. «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» Вологда: ВГУ, 2022. С. 287-291.
93. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Рогачев Д.И. Автоматизация технологических процессов лесозаготовительной машины // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. №12. С. 114-117.
94. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Редкозубов А.В., Беяков В.В. Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 1 (112). С. 171-176.
95. Клубничкин В.Е. Разработка узла сочленения лесной погрузочно-транспортной машины / Клубничкин В.Е. [и др.] // Лесотехнический журнал. 2020. Т.10. №4 (40). С. 217-226.

96. Клубничкин В.Е., Лазарев Д.М. Разработка динамической модели гусеничной беспилотной погрузочно-транспортной машины // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор А.А. Платонов. Воронеж, 2023. С. 94-100.
97. Клубничкин В.Е., Бадиков И.А. Варианты технического облика и конструктивных компоновочных решений колесных беспилотных погрузочно-транспортных машин для сортиментной технологии заготовки древесины // В сборнике: Ежегодная национальная (с международным участием) научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2022 г. Материалы конференции. 2023. С. 195-196.
98. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Карташов А.Б. Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. №3 (130). С. 93-102.
99. Клубничкин В.Е. Определение динамических нагрузок в трансмиссии гусеничной лесозаготовительной машины при преодолении препятствий / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2017. Т.7. №1 (25). С. 185-196.
100. Клубничкин В.Е. Программа и методика проведения экспериментальных исследований погрузочно-транспортной машины в прикладном пакете программ / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2017. Т.7. №4. С. 175-182.
101. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Бухтояров Л.Д. Исследование кинематики и динамики движителя гусеничной лесозаготовительной машины // Лесотехнический журнал. 2014. Т.4. №4 (16). С. 179-190.
102. Клубничкин В.Е. Динамическое моделирование движения гусеничной лесозаготовительной машины с использованием прикладных пакетов

- компьютерных программ / В.Е. Клубничкин [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. №8 (91). С. 41-47.
103. Котиев Г.О., Жилейкин М.М. Моделирование систем транспортных средств: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. 239 с
104. Кондратюк В.А., Воскобойников И.В. Лесное машиностроение: проблемы и перспективы. М.: МГУЛ, 2015. 394 с.
105. Корчак В.Ю., Лапшов В.С., Рубцов И.В. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). С.83-95.
106. Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А. Моделирование реализаций случайных функций характеристик дорожно-грунтовых условий при исследовании динамики колесных и гусеничных машин на этапе проектирования // Известия МГТУ «МАМИ». 2019. 3(41). С. 36-46.
107. Котиев Г.О., Дьяков А.С. Метод разработки ходовых систем высокоподвижных безэкипажных наземных транспортных средств // Известия ЮФУ. 2016. №1 (174). С. 186–197.
108. Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. Т. 1. С. 45-59.
109. Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля // Наука и образование. 2011. № 12, С. 1-20.
110. Котиев Г.О., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А. Определение скоростных диапазонов многоцелевых колесных и гусеничных машин с электромеханической трансмиссией // Труды НАМИ. 2017. №3 (270).
111. Котиков В.М. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли (колесные и гусеничные машины) / В.М. Котиков. М.: МГУЛ, 2007. 353 с.
112. Котиков В.М., Ерхов А. В. Тракторы и автомобили. – М.: Академия, 2010. 415.

113. Котиков В.М. Воздействие лесозаготовительных машин на лесные почвы: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. М.: МЛТИ, 1995. 214 с.
114. Кочнев А.М. Повышение эксплуатационных свойств колесных трелевочных тракторов путем обоснования их основных параметров: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. СПб, 1995. 36 с.
115. Красненьков В.И., Харитонов С.А. Динамика криволинейного движения транспортной гусеничной машины // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1980. № 339. С. 3-67.
116. Кристи М.К., Красненьков В.И. Новые механизмы трансмиссий. М.: Машиностроение, 1967. 216 с.
117. Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система почва - урожай. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
118. Ксенович И.П., Гоберман В.А., Гоберман Л.А. Наземные тягово-транспортные системы Том 1. Введение в теорию и методологию исследования наземных транспортных систем. Энциклопедия. М. Машиностроение, 2003. 743 с.
119. Ксенович И.П., Гоберман В.А., Гоберман Л.А. Наземные тягово-транспортные системы Том 2. Аспекты технико-эргономического и экологического проектирования и конструирование наземных транспортных систем. Энциклопедия. М. Машиностроение, 2003. 878 с.
120. Ксенович И.П., Гоберман В.А., Гоберман Л.А. Наземные тягово-транспортные системы Том 3. Техничко-экономические основы проектирования машин и процессов. Методологические аспекты управления проектной деятельностью и принятие решений. Энциклопедия. М. Машиностроение, 2003. 788 с.
121. Кудряшов В.Б., Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013 г. Вып. №3(152). с.42-57.
122. Куркин А.А. Мобильные роботы, робототехнические комплексы и роботизированные системы помощи водителю автотракторной и вездеходной

- техники / А.А. Куркин, В.В. Беляков, Ю.И. Молев [и др.]. Том. Книга 2. Часть 1: Современные наземные мобильные робототехнические системы и комплексы. Условия эксплуатации мобильных систем. Нижний Новгород, 2021. 942 с.
123. Куликов М.И. Исследование поворотливости гусеничных трелевочных тракторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00. М., 1971. 223 с.
 124. Кувшинов А.В. Исследование силового взаимодействия пакетов леса с кониковыми зажимными устройствами бесчokerных трелевочных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Л., 1974. 192 с.
 125. Кушляев В.Ф. Лесозаготовительные машины манипуляторного типа. М.: Лесная промышленность, 1981. 248 с.
 126. Ларин В.В. Физика грунтов и опорная проходимость колесных транспортных средств. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 512 с.
 127. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 391 с.
 128. Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт создания автономных мобильных робототехнических комплексов специального назначения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 2. С. 7.
 129. Левенков Я.Ю., Вольская Н.С. Сглаживающая способность пневматической шины автомобильного колеса при взаимодействии с твердой неровной опорной поверхностью // Технология колесных и гусеничных машин. 2015. № 1. С. 20-26.
 130. Львов Е.Д. Теория трактора. М.: Машгиз, 1960. 228 с.
 131. Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н. Реализация алгоритма вычисления показателя подвижности транспортно-технологических машин в среде имитационного моделирования Matlab Simulink // В сборнике: Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения. Материалы национальной (с международным участием) научно-практической конференции. Казань, 2024. С. 317-320.

132. Макаров В.С. Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Нижний Новгород, 2009. 161 с.
133. Макаров Ф.Н. К вопросу взаимодействия хлыстов с трелевочным трактором // Труды ЦНИИМЭ. Химки, 1968. №86. С. 64-77.
134. Макуев В.А. Научно-методологические основы формирования парка лесосечных машин предприятия: дис. ... докт. техн. наук: 05.21.01. М., 2010. 213 с.
135. Матвейко А.П. Технология и оборудование лесозаготовительного производства: учебник. Минск: Техноперспектива, 2006. 447 с.
136. Махов Г.А. Исследование поворота машин на трелевке леса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 27 с.
137. Мельников В.И. Вывозка леса в хлыстах / В. И. Мельников, П.Г. Сергеев. Москва, Ленинград: Гослесбумиздат, 1957. 100 с.
138. Миронов Е.И. Машины и оборудование лесозаготовок. / Е.И. Миронов [и др.]. М.: Лесная промышленность, 1985. 320 с.
139. Муравьев А.В. Влияние способа транспортировки пакета деревьев на поворотливость гусеничных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Москва, 1966. 22 с.
140. Наказной О.А., Харитонов С.А., Никитин В.А. Частичная оценка целесообразности применения электрической трансмиссии быстроходных гусеничных машин // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 23
141. Наумов В.Н., Котиев Г.О., Горелов В.А., Машков К.Ю., Чижов Д.А. Метод математического моделирования прямолинейного движения роботизированных транспортных средств по деформируемым грунтам // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2012. Специальный выпуск «Робототехника и мехатроника». С. 57-64.
142. Никифорова А.И. Оценка экологической безопасности работы лесных машин / А.И. Никифорова, О.И. Григорьева, Д.С. Киселев, А.М. Хахина [и др.]

- // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона. Материалы Международного научно-практического форума. Хабаровск. 2013. С. 134-138.
143. Орлов С.Ф. Теория и применение агрегатных машин на лесозаготовках. М., Гослесбумиздат, 1963.
 144. Падалкин Б.В., Горелов В.А., Стадучин А.А., Косицын Б.Б., Балковский К.С. Методика определения параметров электромеханической трансмиссии промышленного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 5. С. 21-30.
 145. Пятакин В.И. Технология и машины лесосечных работ: учебник / В.И. Пятакин [и др.]; под ред. В.И. Пятакина. - СПб.: СПбГЛТУ, 2012. 362 с.
 146. Петруша Г.Н. Некоторые вопросы взаимодействия хлыстов с трелевочными механизмами. Труды ЛТА, Л., №83. 1959. С. 83-98.
 147. Платонов В.Ф., Ленашвили Г.Р. Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины. М.: Машиностроение, 1986. 296 с.
 148. Платонов В.Ф. Полноприводные автомобили. 2-е изд., перераб и доп.-е изд. М.: Машиностроение. 1989. 312 с.
 149. Протанский В.В., Сыромятников С.А. Лесоэксплуатация. Гослесбумиздат, 1951. 88 с.
 150. Рудианов Н.А., Хрущев В.С. Обоснование облика боевых и обеспечивающих робототехнических комплексов Сухопутных войск. // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 8. URL:<http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/937.html>
 151. Редькин А.К. Основы моделирования и оптимизации процессов лесозаготовок. М.: Лесная промышленность, 1988. 256 с.
 152. Рудов М.Е. Оценка влияния трелюемой пачки лесоматериалов на уплотнение лесного почвогрунта: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2015. 20 с.
 153. Серебрянный В.В. Исследование характеристик криволинейного движения мобильного робототехнического комплекса / В.В. Серебрянный, Г.О. Котиев, И.В. Рубцов [и др.] // Мехатроника. Автоматизация управления. 2002. №4. С. 21-35.

154. Смахов С.Н. О сопротивлении движению хлыстов при их транспортировке в полуподвешенном (полупогруженном) положении // Труды ЦНИИМЭ, Химки, 1967, №83, 83 с.
155. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
156. Стадухин А.А. Научные методы определения рациональных параметров электромеханических трансмиссий высокоподвижных гусеничных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Москва. 2021. 317 с.
157. Сюнёв В., Соколов А., Коновалов А., Катаров В., Селиверстов А., Герасимов Ю., Карвинен С., Вяльккю Э. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях республики Карелия. Йоэнсуу: НИИ Леса Финляндии, 2008. 126 с.
158. Сухарев Р.Ю. Научные основы автономного управления колесными дорожно-строительными машинами: дис. ... д-ра техн. наук: 2.5.11. Ом., 2023. 320 с.
159. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. М.: Машиностроение, 1970. 175 с.
160. Филькевич И.В. Исследование продольного взаимодействия пакета с тягачом в трелевочной системе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.06.02. ЛТА, Ленинград, 1975. 22 с.
161. Хахина А.М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. СПб, 2018. 318 с.
162. Хитров Е.Г. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб, 2015. 153 с.
163. Хитров Е.Г., Григорьев И.В., Хахина А.М. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта. СПб: СПбГЛТУ, 2015. 152 с.

164. Цофин З.С. Исследование физико-механических характеристик пакетов хлыстов, перевозимых по лесовозным дорогам: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Москва. 1964. 25 с.
165. Цофин З.С. Исследование колебательных характеристик пакетов хлыстов, перевозимых по лесовозным дорогам // Труды ЦНИИМЭ. Химки, 1964. №48, С. 93-109.
166. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
167. Чудаков Е.А. Теория автомобиля. М.: Машгиз, 1950. 347 с.
168. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Лепилин Д.В., Жукова А.И. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6 (111). С. 61-64.
169. Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Жукова А.И. Модель процесса циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелевочному волоку // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2 (41). С. 8-14.
170. Шарипов В.М. Тракторы. Конструкция: учебник для студентов вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / В.М. Шарипов, А.В. Акимов, Д.В. Апельинский [и др.]; под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 804 с.
171. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб: ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. 344 с.
172. Шелгунов Ю.В., Кутуков Г.М., Лебедев Н.И. Технология и оборудование лесопромышленных предприятий. М.: МГУЛ, 2002. 589 с.
173. Ширнин Ю.А., Онучин Е.М. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины // Лесной журнал. 2003. № 4. С. 510.
174. Шмаков, А.Ю. Прогнозирование характеристик криволинейного движения сочлененных гусеничных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Москва, 2000. 117 с.
175. Шухман С.В., Соловьев В.И., Прочко Е.И. Теория силового привода колес автомобилей высокой проходимости: Агробизнесцентр, 2007. 336 с.

176. Эмайкин Л.М. О параметрическом возбуждении в системе гусеничный трактор-полупогруженное дерево // Труды ЦНИИМЭ. Химки. 1969. №101. С. 52-59.
177. Эмайкин Л.М. К определению длины приподнятой части хлыста и нагрузки на коник при трелевке за вершину // Труды ЦНИИМЭ. Химки. 1973. №129. С. 37-44.
178. Эмайкин Л.М. К вопросу определения частот свободных колебаний шарнирно-опертого дерева // Труды ЦНИИМЭ. Химки. 1973. №132. С. 50-57.
179. Яковенко Н.В., Бутко Г.П., Мехренцев А.В. Типологические особенности инновационного развития ЛПК // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2022. Т. 10. № 2 (57). С. 124-138.
180. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 февр. 2021 г. № 312-р. Москва, 2021. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573658653>. (дата обращения: 20.02.2025).
181. Bekker M.G. (1969) Introduction to Terrain-Vehicle Systems. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
182. Apetaur M. Transient Tire responses // Automobile Engineer. 1969. №.1. P. 78-86.
183. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E., 2015. The impact of heavy traffic on forest soils // Forest Ecology and Management. Vol. 338, 124-138.
184. Horn R., Vossbrink J., Peth S., Becker S. 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties // Forest Ecology and Management. Vol. 248, Issues 1-2, 56-63.
185. Daniel Queiros da Silva, Filipe Neves Dos Santos, Armando Jorge Sousa, and Vitor Filipe. Visible and thermal image-based trunk detection with deep learning for forestry mobile robotics // Journal of Imaging, 7(9):176, 2021.
186. Daniel Steininger, Julia Simon, Andreas Trondl, Markus Murschitz (2025) TimberVision: A Multi-Task Dataset and Framework for Log-Component Segmentation and Tracking in Autonomous Forestry Operations arXiv:2501.07360v1 [cs.CV].

187. Englund M., Mörk A., Andersson H., Manner J. SemiAutomated Forwarder Crane—Development and Evaluation in a Simulator. Skogforsk: Uppsala, Sweden. 2017. 34 pp.
188. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilyev A.S., Ivashnev M.V. Robotic transport platform for forestry // Components of Scientific and Technological Progress. 2022. № 9 (75). C. 6-8.
189. Hellström T., Lärkeryd P., Nordfjell T., Ringdahl O. Autonomous forest vehicles: Historic, envisioned, and state-of-the-art // Int. J. For. Eng. 2009, 20, 31-38. <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702573>.
190. Jean-Michel Fortin, Olivier Gamache, Vincent Grondin, Francois Pomerleau, and Philippe Giguere. Instance segmentation for autonomous log grasping in forestry operations // In International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 6064-6071. IEEE, 2022.
191. Hellström T., Ringdahl O. Follow the Past: a path-tracking algorithm for autonomous vehicles // Int. J. Vehicle Autonomous Systems, Vol. 4, Nos. 2-4, 2006. C. 216-224
192. Edo Jelavic, Dominic Jud, Pascal Egli, and Marco Hutter. Towards autonomousrobotic precision harvesting: Mapping, localization, planning and control for a legged tree harvester. arXiv preprint arXiv:2104.10110, 2021.
193. Klubnichkin V.E. Researching rolling resistance of the wheeled forestry tractor at skidding / V.E. Klubnichkin [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 695(1). 012003. doi:10.1088/1757-899X/695/1/012003.
194. La Hera P., Mendoza-Trejo O., Lindroos O., Lideskog H., Lindbäck T., Latif S., Li S., Karlberg M. Exploring the feasibility of autonomous forestry operations: Results from the first experimental unmanned machine // J. Field Robot. 2024, 41, 942–965. <https://doi.org/10.1002/rob.22300>.
195. Lever, P. Automation and robotics // In SME Mining Engineering Handbook, 3d ed.; Darling, P., Ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: electronically published, 2011. pp. 805-824.

196. Lundqvist R., Lindroos O., Blagojević B. Expert-Based Ten-Year Forecast for Logging Machines and Systems in Sweden // *Forests* 2025. 16. 144. <https://doi.org/10.3390/f16010144>
197. Lundbäck M., Häggström T.C., Nordfjell T. Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood // *Int. J. For. Eng.* 2021, 32, 202-215. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1906617>
198. Lindroos O., La Hera P., Häggström C. Drivers of Advances in Mechanized Timber Harvesting—a Selective Review of Technological Innovation // *Croat. J. For. Eng.* 2017, 38, 243-258
199. Lindroos O., Mendoza-Trejo O., La Hera P., Ortiz Morales D. Advances in using robots in forestry operations // In *Robotics and Automation for Improving Agriculture*, 1st ed.; Billingsley, J., Ed.; Burleigh Dodds Science Publishing: London, UK, 2019; pp. 233-260. <https://doi.org/10.1201/9780429266737>.
200. Pedro La Hera, Omar Mendoza-Trejo, Ola Lindroos, Hakan Lideskog, Torbjorn Lindbäck, Saira Latif, Songyu Li, and Magnus Karlberg. Exploring the feasibility of autonomous forestry operations: Results from the first experimental unmanned machine // *Journal of Field Robotics*, 41(4):942-965, 2024.
201. Pasi Rautio, Håkan Lideskog, Urban Bergsten, Magnus Karlberg Perspectives: Lean forestry – A paradigm shift from economies of scale to precise and sustainable use of ecosystem services in forests // *Forest Ecology and Management* 530 (2023) 120766. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120766>
202. Qiujie Li and Yu Yan. Street tree segmentation from mobile laser scanning data using deep learning-based image instance segmentation // *Urban Forestry & Urban Greening*, 92:128200, 2024.
203. Sandu C., Kolansky J., Botha T.R., Els P.S. (2015) Multibody dynamics techniques for real-time parameter estimation // *Science for Peace and Security Series D: Information and Communication Security*, IOS Press, pp. 221-241.10.3233/978-1-61499-576-0-221.
204. Semberg T., Nilsson A., Björheden R., Hansson L. Real-time target point identification and automated log grasping by a forwarder, using a single stereo

- camera for both object detection and boom-tip control // Silva Fenn. 2024, 58, 23062. <https://doi.org/10.14214/sf.23062>.
205. Steven W Chen, Guilherme V Nardari, Elijah S Lee, Chao Qu, Xu Liu, Roseli Ap Francelin Romero and Vijay Kumar. Sloam: Semantic lidar odometry and mapping for forest inventory // IEEE Robotics and Automation Letters, 5(2):612–619, 2020.
206. Sulaiman H., Saadun M.N.A., Yusof A.A. Modern manned, unmanned and teleoperated excavator system // J. Mech. Eng. Technol. 2015, 7, 57-68. <https://doi.org/10.2022/jmet.v7i1.539>.
207. Vantsevich V.V., Lozynskyy A., Demkiv L., Klos S. (2017) A foundation for real-time tire mobility estimation and control // Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, Budapest, Hungary.
208. Vincent Grondin, Francois Pomerleau, and Philippe Giguere. `Training deep learning algorithms on synthetic forest images for tree detection // In Workshop in Innovation in Forestry Robotics: Research and Industry Adoption (ICRA), 2022.
209. Wong J.Y., Huang W. (2006) Wheels vs tracks' - A fundamental evaluation from the traction perspective // Journal of Terramechanics, vol. 43, no. 1. pp. 27-42.
210. Wong J.Y. (2008) Theory of Ground Vehicles. John Wiley & Sons.
211. Wong J.Y. (2009) Terramechanics and Off-road Vehicle Engineering: Terrain Behaviour, Off-road Vehicle Performance and Design. Butterworth- Heinemann, Oxford.
212. Wu Q., Liu Y., Wu C. An overview of current situations of robot industry development // In ITM Web of Conferences; EDP Sciences: web conference, 2018; Volume 17. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20181703019>.
213. FAO. (n.d.). Forestry. Retrieved from <http://www.fao.org/forestry/en/>. (дата обращения 19.12.2024).
214. World Bank. (n.d.). Forestry and Natural Resources. Retrieved from <https://data.worldbank.org/topic/agriculture-and-rural-development> (дата обращения 20.12.2024).

215. ФАО. 2023 год. Производство и торговля лесной продукцией. См.: ФАОСТАТ. Рим [по состоянию на 15 октября 2023 года], <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/FO>. (дата обращения 20.12.2024).
216. ФАО. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. DOI: 10.4060/ca9825en.
217. Инновационные системы лесных машин / Лесопромышленник, май-июнь 2 (50). 2009, С. 13-19.
218. Универсальный механизм - программный комплекс для моделирования динамики механических систем [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.umlabor.ru/pages/index.php> (дата обращения: 15.02.2024).
219. ФРУНД - программная система формирования решений уравнений нелинейной динамики [Электронный ресурс]. – URL: <http://frund.vstu.ru/> (дата обращения: 15.02.2024).
220. EULER – Software Complex for Automated Dynamic Analysis of Multibody Mechanical Systems [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.euler.ru/index.php/euler> (дата обращения: 15.02.2024).
221. ADAMS – The Multibody Dynamics Simulation Solution [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения: 15.02.2024).
222. MATLAB Simscape/Multibody – Model and simulate multibody mechanical systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape-multibody.html> (дата обращения: 15.02.2024).
223. Информационный ресурс по поиску работы https://hh.ru/search/vacancy?text=%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80+%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B0&salary=&ored_clusters=true&excluded_text=&hhFrom=vacancy_search_list&hhFromLabel=vacancy_search_line (дата обращения 03.02.2025).
224. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М., Наука, 1967.

225. Пчелин И.К., Хачатуров А.А. Применение уравнений кинематических связей для исследования устойчивости движения и управляемости автомобиля с помощью аналогичных машин // Автомобильная промышленность. 1966. № 5. С. 38-47.
226. Эллис Д.Р. Управляемость автомобиля: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
227. Дайбол В.Б., Хаген Д.Х. Поперечная устойчивость автомобильных прицепов. М.: Мир // Труды американского общества инженеров-механиков: Конструирование и технология машиностроения. 1969. №4. С. 153-159.
228. Бин К. Исследование колеи трехосного автомобиля и колеи тягача с прицепной повозкой // Мотор. 1932. №10. С. 12-14.
229. Тюрин А.В., Науменко И.М., Воропанов П.В. Лесная вспомогательная книжка: (По таксации леса). М., Гослесбумиздат, 1956. 532 с.

Приложение

1. Расчет экономического эффекта внедрения беспилотных технологий

1.1. Расчет средней заработной платы оператора трелевочной машины

Если средняя зарплата оператора трелевочной машины/форвардера в РФ [223] составляет 225000 руб. (после вычета налогов), то для расчета годовой зарплаты нужно учесть следующие шаги:

1. Расчет годовой чистой зарплаты:

Чистая зарплата в месяц: 225 000 руб.

Годовая чистая зарплата: $225000 \times 12 = 2700000$ руб.

2. Расчет годовой зарплаты до вычета налогов:

В России подоходный налог (НДФЛ) составляет 13%. Чтобы узнать зарплату до вычета налогов, используем формулу:

$$\text{ЗП до налогообложения} = \frac{\text{Чистая зарплата}}{1 - \text{ставка НДФЛ}}$$

$$\text{ЗП до налогообложения} = \frac{225000}{1 - 0,13} \approx 258620,69 \text{ руб.}$$

Годовая зарплата до налога:

$$258620 \times 12 \approx 3103440 \text{ руб.}$$

Итог:

Годовая чистая зарплата: 2 700 000 руб.

Годовая зарплата до вычета налогов: около 3 103 440 руб.

1.2. Стоимость изготовления кабины лесозаготовительной машины

1. Материалы: Сталь: 150000 – 300000 руб.; Алюминий: 100000 – 200000 руб.; Стекло: 80000 – 150000 руб.; Пластик и композиты: 50000 – 100000 руб.

2. Системы безопасности: ROPS/FOPS: 200000 – 400000 руб.;

Аварийные системы: 100000 – 200000 руб.

3. Комфорт и эргономика: Сиденья: 50000 – 100000 руб.; Климат-контроль: 100000 – 200000 руб.; Звукоизоляция: 50000 – 100000 руб.

4. Электроника и управление: Панели управления и датчики: 100000 – 200000 руб.; Системы связи: 50000 – 100000 руб.

5. Трудозатраты: Сборка: 200000 – 400000 руб.

6. Сертификация и тестирование: 100000 – 200000 руб.

Итоговая стоимость:

- Базовая кабина: ~500000 – 800000 руб.

- Кабина среднего уровня: ~800000 – 1500000 руб.

- Премиальная кабина: ~1500000 – 3000000 руб.

Дополнительные затраты:

- Логистика и доставка: если кабина изготавливается на стороннем предприятии.

- Налоги и накладные расходы: обычно добавляются к стоимости производства.

1.3. Энергопотребление на климатические системы лесозаготовительной машины

1. Мощность климатической системы:

- Отопление: обычно требует от 1 до 5 кВт.

- Кондиционирование: может потреблять от 2 до 6 кВт.

Пример: если лесозаготовительная машина работает в холодное время года и система отопления потребляет 2 кВт, то за 1 час работы будет израсходовано 2 кВт·ч. Если же в жаркое время года система кондиционирования потребляет 4 кВт, то за 1 час будет израсходовано 4 кВт·ч.

Экономия энергии на климатической системе лесозаготовительной машины в размере 72 кВт·ч за сутки (согласно проведенным расчетам) приводит к:

- Экономии затрат: до 1080 рублей в день (дизель стоимостью ≈ 60 р.).

- Снижению выбросов CO₂: до 17,6 тонн в год (дизель).

- Улучшению экологических показателей и повышению конкурентоспособности.

Эти расчеты показывают, что даже небольшая экономия энергии на одной машине может иметь значительный эффект при масштабировании на парк лесозаготовительной техники или длительный период эксплуатации.

1.4. Снижение металлоемкости

В связи с изменением компоновки в части необходимости использования кабины оператора снижение массы трелевочной машины на 1 тонну (с 15 до 14 тонн) согласно расчетов приводит к:

- Снижению энергопотребления: на 4,8 кВт·ч.
- Экономии энергии за год: 14400 кВт·ч.
- Экономии топлива за год: 3600 литров дизеля.
- Экономии в денежном выражении: 216000 руб/год.

1.5. Стоимость оборудования для беспилотной работы трелевочной машины

Стоимость оборудования для беспилотной работы трелевочной машины зависит от сложности задач, уровня автономности и выбранных технологий. Ниже представлен примерный перечень компонентов и их ориентировочная стоимость в долларах США (на 02.2025г. курс 90 рублей за 1\$):

1. Система точного позиционирования (GPS/ГЛОНАСС с RTK).
Стоимость: 5 000 – 15 000 \$.
2. Лидар (LiDAR) или радар. Стоимость: 2 000 – 10 000 \$.
3. Камеры и системы компьютерного зрения. Стоимость: 1 000 – 5 000\$.
4. Бортовой компьютер. Стоимость: 2 000 – 7 000 \$.
5. Системы управления (актуаторы) – электромеханические или гидравлические системы для управления рулевым механизмом, тормозами, стрелой и другими функциями. Стоимость: 3 000 – 10 000 \$.
6. Программное обеспечение - ПО для автономного управления, планирования маршрутов, анализа данных и взаимодействия с другими машинами. Стоимость: 5 000 – 20 000 \$.
7. Датчики (ультразвуковые, инфракрасные, гироскопы). Стоимость: 1000 – 3000 \$.

8. Системы связи (4G/5G, Wi-Fi, радио). Стоимость: 500 – 2 000 \$.

9. Дополнительные компоненты - батареи, источники питания, крепления, защитные корпуса для оборудования. Стоимость: 1 000 – 3 000 \$.

10. Адаптация для лесозаготовительных условий - усиленная защита оборудования от влаги, пыли, вибраций и механических повреждений. Стоимость: 2 000 – 5 000 \$.

Итого:

- Минимальная стоимость: около 25 000 – 30 000 \$.
- Средняя стоимость: 40 000 – 60 000 \$.
- Высокотехнологичное решение: до 80 000 \$ и выше.

1.6. Оценка стоимости переоборудования трелевочной машины в беспилотное исполнение

Для оценки стоимости переоборудования трелевочной машины в беспилотное исполнение с использованием коллаборативной технологии заготовки древесины, нужно учесть несколько факторов:

1. Стоимость базовой трелевочной машины (скиддера JohnDeere): 300000 – 400000\$.

2. Дополнительное оборудование:

- Системы автономного управления (лидары, камеры, датчики, ГЛОНАСС/GPS).

- Программное обеспечение для навигации и управления.

- Системы связи и передачи данных.

- Модернизация механических систем для автономной работы.

3. Затраты на разработку и интеграцию:

- Адаптация коллаборативной технологии (взаимодействие с другими машинами и системами).

- Тестирование и сертификация.

4. Трудозатраты и услуги специалистов.

Ориентировочная стоимость переоборудования может составлять 30-50% от стоимости базовой трелевочной машины.

1.7. Сравнение средней производительности трелевочной машины с оператором и в беспилотном исполнении

Отсутствие оператора на борту БПТМ позволит существенно повысить ее подвижность по сравнению с машинами классической компоновки из-за отсутствия психофизиологических ограничений, связанных с нахождением человека на борту, что позволит с учетом запаса прочности элементов конструкции машины без существенных конструктивных изменений увеличить скорость движения БПТМ в порожнем состоянии [37].

Исходные данные:

Средняя производительность обычной трелевочной машины за 8-часовую смену: 65 м³.

Время смены: 12 часов.

Скорость движения:

Обычная машина: С грузом: 5 км/ч. Без груза: 10 км/ч.

Беспилотная машина: С грузом: 5 км/ч. Без груза: 20 км/ч (в 2 раза быстрее обычного).

Расчет времени на один цикл трелевки:

Цикл трелевки включает: Движение с грузом от места заготовки до погрузочной площадки. Движение без груза обратно к месту заготовки. (В расчете пренебрегаем выполнение технологических операций сбора, разгрузки и окучиваяния).

Примерные параметры:

Расстояние трелевки: 500 метров (0,5 км).

Время движения с грузом: 6 минут.

Время движения без груза:

Для обычного трактора: 3 минуты.

Для беспилотного трактора: 1,5 минуты.

Общее время цикла:

Обычная машина: 6 минут (с грузом) + 3 минуты (без груза) = 9 минут.

Беспилотная машина: 6 минут (с грузом) + 1,5 минуты (без груза) = 7,5 минут.

Расчет количества циклов за смену:

Обычная машина: 80 циклов.

Беспилотная машина: 96 циклов.

Расчет производительности:

Итог:

Производительность обычной машины за 12 часов: около 98 м³.

Производительность беспилотной машины за 12 часов: около 118 м³.

Таким образом, беспилотная трелевочная машина, движущаяся в порожнем состоянии в 2 раза быстрее, может увеличить производительность на ~20% (с 98 до 118 м³ за смену).

1.8. Оптимизация режимов движения БПТМ

Плавное ускорение и торможение (за счет оптимизации режимов движения, избегать резких маневров, которые увеличивают расход энергии) позволит беспилотной машине быть более энергоэффективной.

Ниже представлен пример расчета.

1. Исходное энергопотребление машины:

Машина расходует 30 литров дизельного топлива в час.

- Удельный расход топлива: 0,25 л/кВт·ч (при КПД двигателя около 40%).
- Энергопотребление за час: 120 кВт·ч.

2. Экономия за счет плавного ускорения и торможения:

- Резкие маневры увеличивают расход энергии на 10–20%. Плавное управление может снизить энергопотребление на 5–10%. Возьмем среднее значение - 7,5%.

3. Экономия за счет адаптации к условиям местности:

- Оптимизация маршрутов и адаптация к рельефу могут снизить энергопотребление на 5–15%. Возьмем среднее значение - 10%.

4. Общая экономия:

- Суммарная экономия за счет обоих факторов: 7,5% + 10% = 17,5%.

Расчет снижения энергопотребления:

1. Экономия энергии за час:

$$120 \text{ кВт}\cdot\text{ч} * 0,175 = 21 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

2. Новое энергопотребление за час:

$$120 - 21 = 99 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Расчет экономии за год:

1. Предположим, трелевочная машина работает 12 часов в день и 250 дней в году:

$$12 * 250 = 3000 \text{ ч/год}$$

2. Экономия энергии за год:

$$21 \text{ кВт}\cdot\text{ч} * 3000 = 63000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

3. Экономия топлива за год:

$$63000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} * 0,25 \text{ л/кВт}\cdot\text{ч} = 15750 \text{ литров дизеля/год.}$$

4. Экономия в денежном выражении:

При стоимости дизеля 60 рублей за литр:

$$15750 * 60 = 945000 \text{ руб./год}$$

Итог:

Благодаря плавному ускорению, торможению и адаптации к условиям местности, машина станет энергоэффективнее на:

- Снижение энергопотребления: на 21 кВт·ч.
- Экономия энергии за год: 63000 кВт·ч.
- Экономия топлива за год: 15750 литров дизеля.
- Экономия в денежном выражении: 945000 руб/год.

Дополнительные преимущества:

1. Снижение износа оборудования:

Плавное управление уменьшает нагрузку на двигатель, трансмиссию и другие узлы, что продлевает срок службы машины.

2. Снижение выбросов CO₂:

Экономия 15750 литров дизеля эквивалентна снижению выбросов CO₂ на:

$$15750 * 2,68 \text{ кг/л} = 42210 \text{ кг CO}_2 \text{ (или 42,21 тонн CO}_2\text{)}.$$