

A  
И 20

На правах рукописи



**ИВАНОВ Николай Алексеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МАЛЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИИ  
ОБОСНОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ И УЛУЧШЕНИЕМ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ**

05.21.01 – “Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства”

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

г. Екатеринбург – 2013

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Иванченко Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: Ковалев Рудольф Николаевич  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Уральский  
государственный лесотехнический  
университет», зав. кафедрой

Григорьев Игорь Владиславович  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный лесотехнический университет»  
им. С.М. Кирова, профессор

Иванов Виктор Александрович  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Братский государственный  
технический университет», зав. кафедрой

Ведущая организация: ФГУ «Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», г. Хабаровск

Защита состоится «28» марта 2013 г. в 10–00 на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Уральского государственного лесотехнического университета.

Автореферат разослан «25» февраля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Куцубина Нелли Васильевна

**Актуальность темы исследования.** Дальневосточный регион РФ кроме древесины обладает значительными запасами ценных природных ресурсов. Только в Хабаровском крае можно ежегодно безболезненно для природы собирать порядка 9 тыс. тонн ягод, около 4,7 тыс. тонн орехов, 1,5 тыс. тонн папоротника, 3,7 тыс. тонн грибов, практически неограниченный объем березового сока и около 1 тыс. тонн лекарственного сырья. Однако этот потенциал используется далеко не в полную меру. Процент освоения ресурсного потенциала в советские времена составлял порядка 10 %, а при переходе в экономике к рыночным отношениям резко снизился и в настоящее время составляет ничтожную величину, измеряемую 1–2 процентами.

Основная причина такого положения заключается в практически полном отсутствии транспортной инфраструктуры в зоне заготовки лесных продуктов. Отсутствуют дороги, существующие транспортные средства имеют высокую стоимость, негативно воздействуют на окружающую среду, энергонасыщены, расходуют много топлива, поэтому их использование в лесопромышленном производстве экономически нецелесообразно.

Исследования, выполняемые на протяжении более двух десятилетий в Тихоокеанском государственном университете (г. Хабаровск), показали перспективность использования вездеходов на пневматиках сверхнизкого давления в качестве транспортных средств лесопромышленного производства.

В связи с этим возникла необходимость изучения условий эксплуатации транспортных средств на лесопромышленном производстве с учетом региональной специфики, исследования взаимодействия вездехода с лесными препятствиями и на основе этого формирование рекомендаций по их проектированию, улучшающих эксплуатационные свойства.

Поэтому разработка научных основ теории легких колесных вездеходов, которую необходимо использовать при обосновании их параметров, выборе основных агрегатов и узлов, проведении прочностных расчетов является важной народнохозяйственной задачей, определяющей актуальность работы.

**Степень разработанности темы исследований.** Диссертация представляет собой законченное научное исследование, включающее в себя изучение состояния проблемы и постановку цели и задач, теоретический анализ изучаемых процессов с составлением математических моделей и их исследование на ПЭВМ по специально составленным программам, изготовление опытных образцов вездеходов и их экспериментальное исследование, практическую реализацию исследования в виде рекомендаций по выбору основных параметров вездехода для конкретных природно-производственных условий эксплуатации и методики прочностного расчета рамы вездехода с использованием метода конечных элементов.

**Целью диссертационной работы** является формирование теоретических предпосылок, позволяющих повысить эффективность использования легких колесных вездеходов в качестве транспортных средств лесопромышленного производства обоснованием параметров и улучшением их эксплуатационных качеств.

**Объект и предмет исследований.** Объектом исследования являются опытные образцы вездеходов на высокоэластичных движителях и природно-производственные условия их эксплуатации.

Предметом исследования являются математические модели взаимодействия вездехода на высокоэластичных движителях с лесными препятствиями.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи исследования:

- – определение места и роли экологических вездеходов на пневматиках сверхнизкого давления в современной организации лесопользования, философских и социально-экономических аспектов их создания и использования;
- – изучение природно-производственных условий эксплуатации вездеходов при обслуживании лесопромышленного производства, моделирование характеристик наиболее распространенных лесных препятствий и древостоев;
- – исследование взаимодействия вездехода на высокоэластичных движителях с лесными препятствиями с целью обоснования его параметров и оценки нагруженности деталей вездехода при расчете конструкции на прочность;
- – аналитические исследования профильной проходимости вездехода под пологом леса с целью выявления влияния конструктивных параметров и производственных условий на его эксплуатационные качества и на основе этого разработка и реализация теоретических моделей и экспериментальных методик обоснования технических решений по обоснованию параметров и повышению эффективности использования вездеходов;
- – проведение экспериментальных исследований с целью изучения характеристик движителей и вездеходов в целом, проверки и подтверждения полученных теоретических зависимостей, обоснования параметров транспортного средства для лесопромышленного производства и определения его работоспособности при выполнении различных технологических операций;
- – разработка методологических основ проектирования и расчета легких колесных вездеходов, обоснование расчетных режимов движения и методики проектирования рамы вездехода с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

#### Научная новизна.

1. Разработаны теоретические основы создания и использования экологически безопасных, высокопроходимых транспортных средств для целей лесопромышленного производства, позволяющие оценить условия их эксплуатации, обосновать основные параметры, обеспечивающие повышение эксплуатационных качеств, прогнозировать нагрузки на агрегаты вездехода, производить корректный расчет основных элементов на прочность, повысить надежность и безотказность их эксплуатации.

2. Впервые разработана методика анализа профильной проходимости вездехода под пологом леса по критерию вероятности преодоления участка местности под пологом леса и получены аналитические зависимости,

позволяющие оценить влияние различных параметров вездехода и условий его эксплуатации на профильную проходимость.

3. Предложена математическая модель взаимодействия легких колесных вездеходов на высокоэластичных движителях с препятствиями в условиях лесной среды их применения, позволяющая обосновать основные параметры вездеходов с целью улучшения их эксплуатационных свойств, а также прогнозировать нагрузки на элементы ходовой части.

4. Разработаны методологические основы проектирования и расчета легких колесных вездеходов, позволяющие аргументированно выбирать основные их агрегаты, выполнить общую компоновку вездехода, обоснованно выбрать расчетные режимы движения, произвести расчет на прочность рамы вездехода с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

#### Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Предложено решение принципиально важной для создания новой машины задачи – обоснование параметров и расчет основных элементов с учетом конкретных характеристик природно-производственных условий ее эксплуатации.

2. Практическая реализация предлагаемой технологии организации лесопромышленного производства с использованием легких колесных вездеходов позволяет увеличить площадь обслуживаемых угодий более, чем в 2,5 раз с соответствующим увеличением объемов заготавливаемой и перерабатываемой продукции.

3. Разработанные математические модели динамического взаимодействия вездехода с лесными препятствиями позволяют установить рациональное распределение масс между передними и задними колесами, выбрать параметры движителя, обеспечивающие преодоление этих препятствий, получить данные для прочностного расчета колес и рамы.

4. Внедрение результатов исследований создает предпосылки повышения конкурентоспособности вновь проектируемых вездеходов за счет улучшения показателей проходимости и надежности.

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований создан ряд конструкций вездеходов с разными движителями, компоновкой и энергонасыщенностью.

6. Разработанная методика проектирования и расчета вездеходов применяется в учебном процессе при изучении дисциплины “Теория и конструкция лесотранспортных машин”, а также при выполнении выпускных квалификационных работ.

**Методология и методы исследования.** Теоретической основой исследований явились работы ведущих отечественных и зарубежных ученых по анализу движения колесных и гусеничных машин в условиях бездорожья, научные работы по проектированию и совершенствованию лесных машин, материалы международных и всероссийских конференций по проблемам лесных ресурсов и лесного дела.

В работе использованы базовые методы научно-технического познания, теоретической механики, математического моделирования, математической

статистики, теории вероятностей, сопротивления материалов, измерения и обработки экспериментальных данных.

Автор в своих исследованиях опирался на фундаментальные работы видных ученых в области теории лесопромышленных и лесохозяйственных машин, их проектирования и использования – Александрова А.В., Анисимова Г.М., Бартенева И.М., Варавы В.И., Герасимова Ю.Ю., Григорьева И.В., Добрынина Ю.А., Жукова А.В., Ковалева Р.Н., Котикова В.М., Кочнева А.М., Курьянова В.К., Орлова С.Ф., Пятакина В.И., Полетайкина В.Ф., Провоторова Ю.И., Семенова Н.Ф., Силаева Л.А., Силукова Ю.Д., Сюнева В.С., Холопова В.Н. и др.

На рис. 1 представлена структура и общая методология исследований.

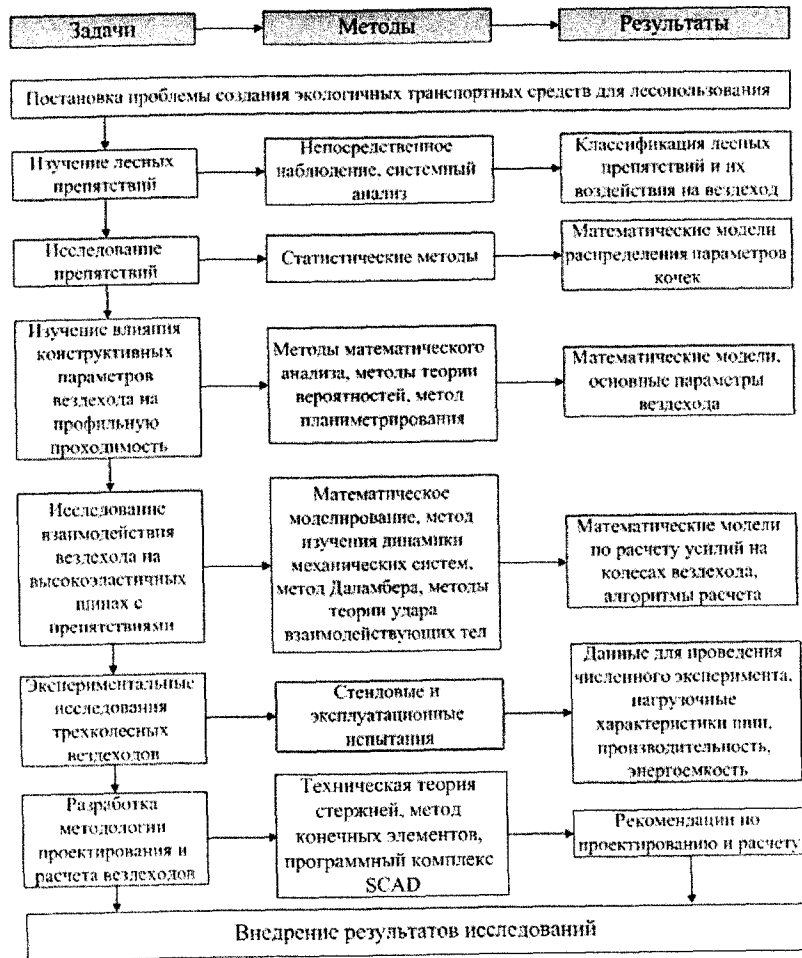


Рис. 1. Структура и методология исследований

Она включает семь взаимоувязанных задач, позволяющих достигнуть намеченную цель путем решения их с использованием современных методов исследований.

#### Положения, выносимые на защиту:

- методологические основы проектирования и расчета легких колесных вездеходов для использования их в качестве транспортных средств лесопродукционного производства;
- статистические характеристики кочек как основных препятствий для движения вездехода;
- математические модели взаимодействия вездехода на высокоэластичных движителях с лесными препятствиями;
- математические модели влияния конструктивных параметров вездеходов и условий их эксплуатации на профильную проходимость при движении под пологом леса.

Основная идея работы заключается в том, что уровень развития и эффективность лесопродукционного производства, занимающегося использованием и воспроизводством лесных ресурсов, могут быть существенно повышены за счет использования в его технологическом процессе специальных транспортных средств – легких вездеходов на шинах сверхнизкого давления. Их использование позволяет значительно увеличить площади обрабатываемых лесных угодий, уменьшить отрицательное экологическое воздействие техники на природную среду, повысить объемы заготавливаемой продукции, снизить ее себестоимость и тем самым повысить эффективность производства.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается применением современных методов исследования, подтверждается обоснованностью принятых допущений, обоснованностью методов расчета и моделирования, а также подтверждается экспериментальными исследованиями опытных образцов вездеходов.

Основные положения диссертации доложены и обсуждались на:

- II международной конференции “Лесные биологически активные ресурсы (березовый сок, живица, эфирные масла, пищевые, технические и лекарственные растения)”, Хабаровск, ФГУ “ДальНИИЛХ”, 10 октября 2004 г.;
- региональной конференции “Перспективы и методы повышения многоцелевого лесопользования на Дальнем Востоке”, Хабаровск, ФГУ “ДальНИИЛХ”, 26 февраля 2004 г.;
- расширенном научном семинаре кафедры “Машины и оборудование лесного комплекса” Тихоокеанского государственного университета в 2005 г.;
- расширенном научном семинаре кафедры “Автомобили и тракторы” Сибирского государственного технологического университета в 2006 г.;
- межвузовской научно-практической конференции “Проблемы и перспективы лесного комплекса”, Воронеж, ВГЛА, 26–27 мая 2005 г.;
- международных научно-технических конференциях “Актуальные проблемы лесного комплекса”, Брянск, БГИТА, 2005 г. (2), 2010 г.

В 2010 году разработка “Экологически безопасный транспорт для лесопродукционного производства” в номинации “Новые высокотехнологические разработки оборудования и наукоемкие технологии” на

Петербургской технической ярмарке “Высокие технологии. Инновации. Инвестиции” (г. Санкт–Петербург, март 2010) удостоена диплома I степени с вручением золотой медали, а также золотой медали на X Московском международном салоне инноваций и инвестиций (г. Москва, 7–10 сентября 2010 г.).

Монография “Основы теории легких колесных вездеходов”, в которой изложено основное содержание диссертации, признана победителем с вручением диплома I степени на Всероссийском смотре–конкурсе монографий по специальности 150405 “Машины и оборудование лесного комплекса”, проведенного в рамках УМО в 2011 году.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 53 научные работы, в том числе две монографии, 32 статьи (из их 15 в изданиях, рекомендованных ВАК), получено 19 авторских свидетельств СССР и патентов РФ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы из 154 наименований и приложений. Изложена на 370 страницах машинописного текста, содержит 145 рисунков и 37 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации и приведена общая характеристика работы.

**В первой главе** рассматривается состояние лесопродукционного производства на Дальнем Востоке и проблема его транспортного обслуживания.

Дальневосточный экономический регион обладает значительными ресурсами для организации лесопродукционного производства. Здесь произрастает около 800 лекарственных, 300 пищевых, 200 медоносных и пыльценосных растений, насчитывается более 300 видов съедобных грибов.

Лишь ничтожно малая часть этих ресурсов используется в настоящее время в качестве пищи и лекарственных средств.

Существующая технология лесопродукционного производства примитивна и основана на использовании ручного труда. Основная проблема заключается в низкой концентрации предмета труда и необходимости транспортировки его до пункта первичной переработки на значительные расстояния. В то же время транспортная инфраструктура производства отсутствует практически полностью.

Между тем специфика предмета труда, условий эксплуатации транспортных машин при организации лесопродукционного производства ставит задачу создания и использования высокопроходимого, маневренного, экологически безопасного, экономичного транспортного средства сравнительно небольшой грузоподъемности, способного осуществлять доставку небольших партий грузов по бездорожью. Такие транспортные средства позволят кардинально изменить технологию лесопродукционного производства, при которой сборщики лесных

продуктов смогут располагаться непосредственно в таежных угодьях рядом с плантациями, что позволит им всю смену заниматься сбором продукции.

Транспортировка же собранной продукции к пункту ее первичной переработки ежедневно от нескольких бригад сборщиков может осуществляться с помощью специальных транспортных средств.

В большой степени требованиям лесопродукционного производства отвечают легкие колесные вездеходы на пневматиках сверхнизкого давления. Первые образцы таких вездеходов появились в восьмидесятих годах прошлого столетия и в настоящее время переживают период промышленного освоения.

Обзор конструкций вездеходов, выпускаемых отечественной промышленностью, показал, что такая техника зачастую очень дорога, недостаточно рентабельна и надежна, слабо адаптирована для эксплуатации в условиях лесопродукционного производства, не учитывает специфических условий эксплуатации в конкретных регионах. Сложившаяся ситуация в технической политике предприятий, выпускающих вездеходы на пневматиках сверхнизкого давления, может быть объяснена, кроме экономических проблем, отсутствием значительных теоретических и экспериментальных исследований в плане обоснования параметров вездеходов для конкретных природно–производственных условий, методологии проектирования и расчета таких вездеходов.

Повышение эффективности использования вездеходов в условиях лесопродукционного производства Дальнего Востока за счет улучшения их эксплуатационных качеств связано, в первую очередь, с изучением характеристик лесных препятствий в конкретных природно–производственных условиях их эксплуатации, с исследованием взаимодействия вездехода с этими препятствиями при движении по бездорожью с целью оптимизации параметров таких вездеходов и получения объективных данных для проведения прочностных расчетов.

Анализ философских и социально–экономических аспектов создания и использования экологичной техники для лесопользования на примере легких вездеходов на пневматиках сверхнизкого давления, которые можно рассматривать в качестве прототипа нового поколения лесной техники, показывает, что она может стать ключевым звеном при ведении ресурсоэксплуатирующего лесного сельского хозяйства в суровых малоосвоенных районах с их бездорожьем, болезненной уязвимостью природы, низкой концентрацией эксплуатируемых ресурсов и малой рентабельностью их добычи.

**Во второй главе** представлена классификация лесных препятствий (рис. 2) и результаты экспериментальных исследований наиболее распространенных из них в природно–производственных условиях Дальнего Востока.

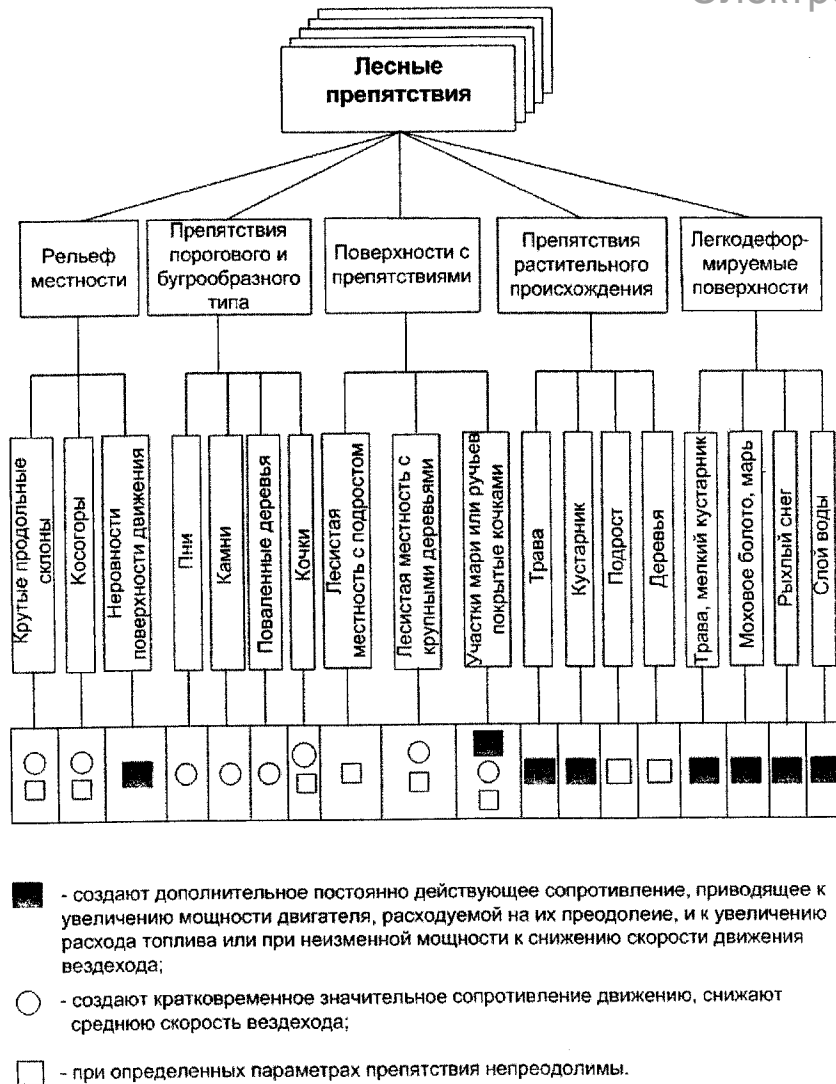


Рис. 2. Классификация лесных препятствий и их воздействие на вездеход

Исходя из опыта эксплуатации лесных вездеходов в условиях Дальнего Востока, можно констатировать, что наиболее часто встречающимися препятствиями являются легкодеформируемые поверхности, неровности поверхности движения, а также лесистая местность с подростом и деревьями и участки мари и поймы рек или ручьев, покрытые кочками.

Обособленные препятствия в виде кочек являются наиболее распространенными препятствиями для движения вездехода в условиях Дальнего Востока, но как препятствия они в настоящее время совершенно не

изучены. Прежде всего это относится к их высоте, длине и расстоянию между кочками, а также к количеству кочек, приходящихся на единицу площади.

Очевидно, что все эти величины являются случайными, поэтому их исследование производилось с использованием методов математической статистики.

Изучение параметров кочек производилось путем измерений на пробных участках, расположенных в различных местах их произрастания, с тем, чтобы обеспечить представительную и достоверную статистику.

Обработка результатов измерений, подбор теоретических законов распределения случайных величин, оценка соответствия теоретических законов эмпирическим данным производилась по общепринятым методикам обработки статистических данных. Расчеты массивов и построение графиков производилось с использованием пакетов прикладных программ "MatCad 2005. Professional" и "Excel 2005", входящих в пакет прикладных программ "Office XP Professional" для операционной системы Windows XP.

В результате были получены математические модели, по которым были построены теоретические кривые плотности и функции распределения по каждому из изучаемых параметров (рис. 3).

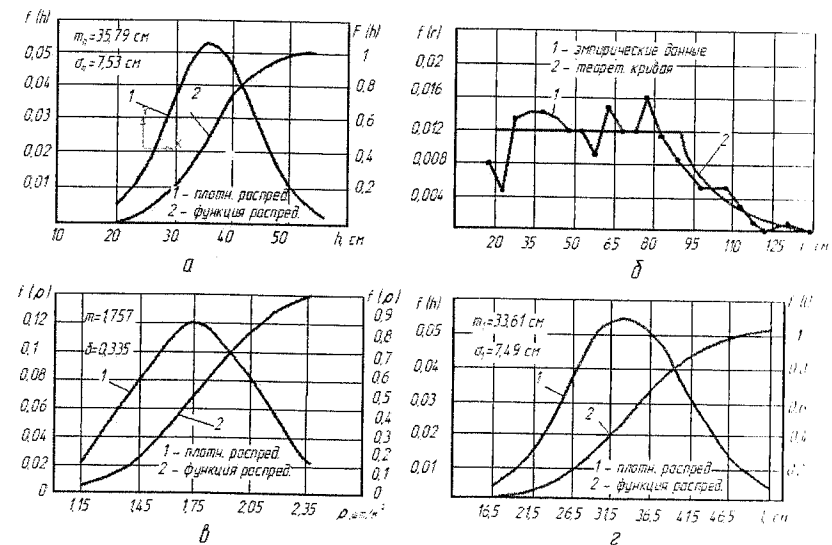


Рис. 3. Плотности и функции распределения параметров кочек: а – высота кочек; б – расстояние между кочками; в – плотность расположения на участке; г – длина кочек

Третья глава посвящена математическому моделированию процесса взаимодействия вездехода на высокоэластичных движителях с препятствиями порогового и бугрообразного типа.

Проблеме изучения движения машин по бездорожью, их взаимодействию с различного рода препятствиями посвящены работы Я.С. Агейкина, В.Ф.

Бабкова, А.К. Бирули, В.П. Бойкова, Н.Ф. Бочарова, Н.А. Бухарина, М.С. Высоцкого, В.В. Горячина, В.А. Грачева, В.В. Гуськова, Г.В. Зимелева, В.И. Кнороза, И.П. Ксеневича, Г.М. Кутькова, В.В. Ларина, М.Н. Летошнева, М.Г. Ляско, В.Н. Наумова, А.Ф. Полетаева, В.А. Скотникова, А.Е. Фаробина, Е.А. Чудакова и др.

Целью исследований, представленных в настоящей главе, является получение математических моделей при взаимодействии колес вездехода с препятствиями порогового или бугрообразного типа, позволяющих обосновать такие параметры вездехода, как диаметр его колес, рациональное распределение массы между ведомыми и ведущими колесами, энерговооруженность, обеспечивающие возможность преодоления лесных препятствий, прогнозировать нагрузки в ходовой части вездехода, которые в дальнейшем можно использовать при прочностных расчетах, при проведении анализа силового и мощностного баланса вездехода.

В основу расчета и анализа каждого из режимов движения вездехода положен классический метод изучения динамики механической системы, в соответствии с которым для выделенного динамического объекта составляется расчетная схема, адекватная рассматриваемому процессу, составляются динамические уравнения, из которых определяются зависимости силовых составляющих от параметров системы "вездеход – окружающая среда". Для описания динамического процесса движения и взаимодействия вездехода с препятствиями использовался метод Даламбера.

При столкновении с пороговым или бугрообразным препятствием колесо вездехода испытывает ударное воздействие, поэтому в расчетах по определению параметров движения были применены методы теории удара взаимодействующих тел.

В соответствии с физической сущностью анализируемых объектов и режимов движения в данных моделях принимается, что деформация поверхности движения мала по сравнению с деформацией пневматического колеса, она не разрушается при движении вездехода. Высокоэластичное пневматическое колесо сверхнизкого давления обладает высокой деформацией, которая существенно зависит от нагрузки на колесо, поэтому для передних и задних колес вездехода она различна.

Выделим ведомое колесо вездехода и рассмотрим процесс наезда на препятствие порогового типа с острыми жесткими гранями и углами (пень, камень или поваленное дерево с торца).

При наезде ведомого колеса на препятствие оно получает удар, приводящий к мгновенному изменению кинематического состояния. В результате удара происходит моментальная смена мгновенных центров скоростей данного колеса. До наезда мгновенный центр скоростей – это точка касания колеса с дорогой  $A$  (рис. 4, а), а после наезда мгновенным центром скоростей становится точка  $U$  – угловая точка порогового препятствия (рис. 4, б).

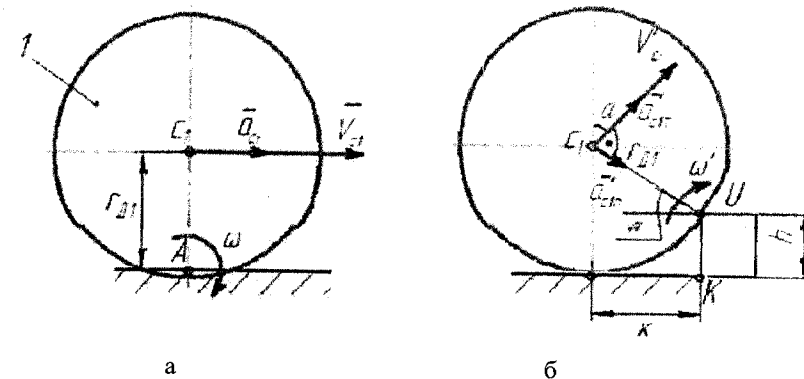


Рис. 4. Кинематические параметры взаимодействия ведомого колеса с препятствием порогового типа: а – до наезда на препятствие; б – после наезда на препятствие

Обозначим кинематические параметры для данной схемы:

$v_{c1}$  – скорость центра масс колеса  $C_1$  до наезда;

$v'_{c1}$  – скорость центра масс колеса  $C_1$  после наезда, в момент, когда  $U$  становится центром скоростей колеса  $C_1$  (рис. 4, б);

$\omega$  – угловая скорость ведомого колеса до наезда (в его движении без проскальзывания);

$\omega'$  – угловая скорость ведомого колеса после наезда (рис. 4, б).

В результате угловая скорость меняется мгновенно от  $\omega = \frac{v_{c1}}{r_{d1}}$  до  $\omega'$ . Для определения угловой скорости  $\omega'$  применим теорему об изменении кинетического момента системы при ударе, в соответствии с которой моменты количества движения в начале и конце удара равны между собой. В результате получаем

$$\omega' = \left\{ 1 - \frac{hr_{d1}}{r_{d1}^2 + i_1^2} \right\} \frac{v_{c1}}{r_{d1}}. \quad (1)$$

Скорость центра масс ведомого колеса вездехода после удара

$$v'_{c1} = \omega' r_{d1} = v_{c1} \left\{ 1 - \frac{hr_{d1}}{r_{d1}^2 + i_1^2} \right\} = \lambda_1 v_{c1}, \quad (2)$$

где

$$\lambda_1 = 1 - \frac{hr_{d1}}{r_{d1}^2 + i_1^2}. \quad (3)$$

Величина  $\lambda_1$  показывает, во сколько раз изменилась скорость центра масс колеса после столкновения с препятствием. Этот параметр является функцией от высоты препятствия  $h$ .

Определим силы, которые проявляют себя при наезде на препятствие. К ним относятся (рис.5):

$\vec{S}$  – толкающая сила со стороны корпуса вездехода, направленная параллельно оси  $x$ ;

$\vec{N}_U$  – нормальная реакция со стороны препятствия в момент отрыва колеса от горизонтальной опоры, направленная по  $UC_1$ ;

$\vec{F}_U$  – тангенциальная сила, как сила сцепления, направленная перпендикулярно  $\vec{N}_U$ .

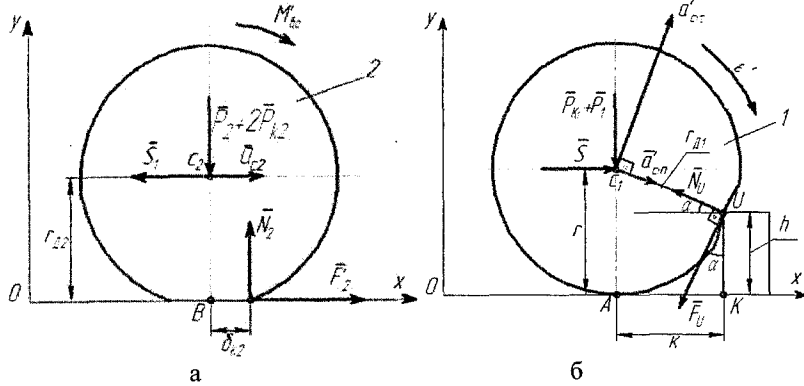


Рис. 5. Расчетные схемы к определению параметров динамического процесса ведущих (а) и ведомого (б) колес после окончания удара

Составим систему уравнений, описывающих динамический процесс движения ведомого колеса в следующее мгновение после окончания удара.

Для расчетной схемы, изображенной на рис. 5, б, динамические уравнения Даламбера запишутся в виде:

$$\begin{cases} m_{\kappa 1} a'_{c_1 x} = S - N_U \cos \alpha - F_U \sin \alpha \\ m_{\kappa 1} a'_{c_1 y} = N_U \sin \alpha - F_U \cos \alpha - P_1 - P_{\kappa 1}, \\ J_{c_1 z} \varepsilon'_1 = F_U r_{\kappa 1} \end{cases} \quad (4)$$

где  $a'_{c_1 x}$ ,  $a'_{c_1 y}$  – проекции ускорения центра колеса  $\vec{a}'_{c_1}$  после столкновения соответственно на оси  $x, y$  данной координатной системы,  $\varepsilon'_1$  – угловое ускорение колеса после столкновения.

Здесь рассматривается модель жесткого порогового препятствия, при котором после окончания удара коэффициент  $\delta_k$ , а вместе с ним  $f_1$  будут равны нулю.

Угловое ускорение  $\varepsilon'$  равно первой производной по времени от угловой скорости  $\omega'$

$$\varepsilon' = \frac{d\omega'}{dt} = \frac{\lambda_1}{r_{\kappa 1}} a_{c_1}.$$

Из третьего уравнения системы (12) можно найти значение силы сцепления  $\vec{F}_U$  в точке  $U$

$$F_U = \frac{J_{c_1 z}}{r_{\kappa 1}^2} \lambda_1 a_c = m_{\kappa 1} \lambda_1 (h) \left( \frac{i_1}{r_{\kappa 1}} \right)^2 a_c. \quad (5)$$

Определим силу  $S$ , действующую от корпуса на переднее колесо, и нормальную реакцию  $N_U$  на препятствие.

Сила  $N_U$  находится из второго уравнения системы (4):

$$N_U = \frac{1}{\sin \alpha} (m_{\kappa 1} a'_{c_1 y} + F_U \cos \alpha + G_1), \quad (6)$$

где  $\sin \alpha = \frac{r-h}{r_{\kappa 1}}$ ,  $\cos \alpha = \frac{\kappa}{r_{\kappa 1}}$ ,  $r$  – радиус недеформированного колеса,  $\kappa = AK$  (рис. 5).

Толкающая сила  $S$  определится из первого уравнения системы (4)

$$S = \frac{1}{\sin \alpha} P_{\kappa 1} \lambda_1 \xi_1 \frac{a_c}{g} + \frac{G_1}{\tan \alpha}, \quad (7)$$

где  $\xi_1 = 1 + \frac{i_1^2}{r_{\kappa 1}^2}$ .

Выделяя теперь пару ведущих задних колес вездехода, рассмотрим их динамику при наезде ведомого колеса на препятствие порогового типа. Требуется определить значение вращательного момента на оси ведущих колес для преодоления доступных препятствий. Силы, действующие на ведущее колесо вездехода при переезде препятствия ведомым колесом, показаны на рис. 5, а.

Составим уравнение динамики ведущих колес в момент завершения удара ведомых колес о пороговое препятствие. Система уравнений для ведущих колес связана непосредственным образом с системой (4) для ведомого колеса.

Эти уравнения записываются для схемы, изображенной на рис. 5, а, следующим образом:

$$\begin{cases} 2m_{\kappa 2} a'_{c_2} = F'_2 - S' \\ 0 = N_2 - P_2 - 2P_{\kappa 2} \\ J_{c_2 z} \varepsilon'_2 = M'_{вр} - N_2 \delta_{\kappa 2} - F'_2 r_{\kappa 2} \end{cases}, \quad (8)$$

где  $a'_{c_2}$  – ускорение центра масс пары ведущих колес в момент прекращения удара ведомого колеса о пороговое препятствие,  $\varepsilon'_2$  – угловое ускорение колес,  $J_{c_2 z}$  – момент инерции колесной пары относительно оси  $C_2 z$ ,  $M'_{вр}$  – вращательный момент, действующий на оси задних колес в случае наезда передним колесом на препятствие.

Выведем зависимость между скоростями  $v'_{c_1}$  и  $v'_{c_2}$  центров передних и задних колес соответственно после удара (рис. 4)

$$v'_{c_2} = v'_{c_1} \frac{1}{r_{\kappa 1}} \left\{ r - h + \sqrt{\frac{r_{\kappa 1}^2 - (r-h)^2}{l^2 - (r-r_{\kappa 1})^2}} (r - r_{\kappa 2}) \right\}. \quad (9)$$

Введем обозначение

$$\psi = \frac{1}{r_{\kappa 1}} \left\{ r - h + \sqrt{\frac{r_{\kappa 1}^2 - (r-h)^2}{l^2 - (r-r_{\kappa 1})^2}} (r - r_{\kappa 2}) \right\}.$$

Тогда (9) запишется в сокращенной форме

$$v'_{c_2} = v'_{c_1} \psi.$$

Проецируя это равенство на ось  $\eta$  (рис. 6), определим угловую скорость прямой  $C_1 C_2$

$$\omega'_{c_1 c_2} = \frac{1}{l} (v'_{c_2} \sin \beta - v'_{c_1} \sin \gamma).$$



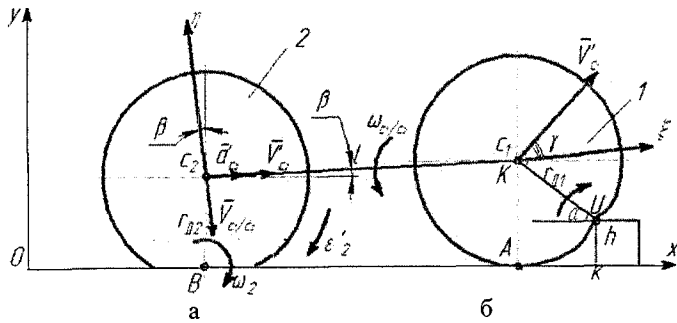


Рис. 6. Расчетная кинематическая схема ведущих (а) и ведомого (б) колес вездехода в момент окончания столкновения ведомым колесом с пороговым препятствием

Учитывая связь скоростей  $v'_{c1}$  и  $v'_{c2}$  находим

$$\omega'_{c1c2} = \frac{v'_{c1}}{l} (\psi \sin \beta - \cos(\alpha + \beta)). \quad (10)$$

Определим ускорение  $\bar{a}'_{c2}$  по известному ускорению  $\bar{a}'_{c1}$

$$a'_{c2} = \lambda_1 a_c \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} + \frac{\lambda_1^2 v_c^2}{\cos \beta} \left[ \frac{\cos(\alpha + \beta)}{r_{d1}} + \frac{(\psi \sin \beta - \cos(\alpha + \beta))^2}{l} \right] \quad (11)$$

После преобразования получим выражение отношения вращательного момента к динамическому радиусу ведущего колеса

$$\frac{M'_{вр}}{r_{d2}} = \frac{\lambda_1 a_c}{g} \left\{ 2P_{к2} \frac{\xi_2 \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} + P_{к1} \xi_1 \frac{1}{\sin \alpha} \right\} + 2P_{к2} \xi_2 \lambda_1^2 v_c^2 \frac{\chi}{g \cos \beta} + G_2 f_2 + \frac{G_1}{tg \alpha}. \quad (12)$$

На рис. 7, а представлены графики, которые характеризуют усилия на колесах, рассчитанные для опытного вездехода с грузом, по формулам (7) и (12).

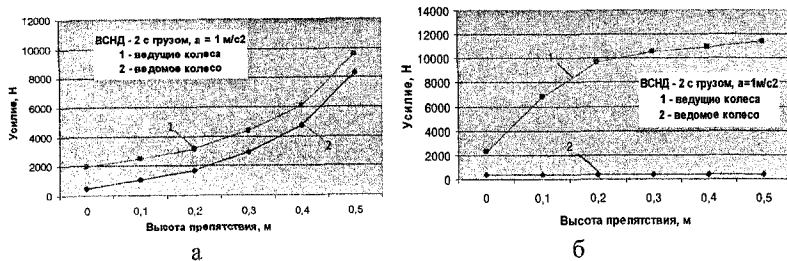


Рис. 7. Усилия на колесах при столкновении вездехода с пороговым препятствием: а – ведомым колесом; б – ведущим колесом

Усилие, действующее на ведомое колесо, – это толкающее усилие  $S$ , которое приложено к оси переднего колеса (рис. 5). Соответственно такое же усилие действует и на раму вездехода в точке крепления передней вилки к оси переднего колеса.

Усилие на ведущих колесах – это отношение вращательного момента на задней оси вездехода к динамическому радиусу колеса. Это усилие разлагается на две составляющие, первая приложена в точке касания ведущего колеса с преодолеваемым препятствием, а вторая в точке касания колеса с опорной поверхностью и направлена в сторону движения вездехода. Представленное усилие на графиках – это суммарное усилие, действующее под левым и правым ведущими колесами. При установке в ведущем мосту вездехода симметричного конического дифференциала усилия под левым и правым колесами при равенстве динамических радиусов всегда равны между собой.

По аналогичной методике был проанализирован процесс столкновения вездехода ведущим колесом с препятствием порогового типа. В результате были получены математические модели для определения усилий, действующих на переднее ( $S$ ) и задние ( $\frac{M_{вр}}{r_{д3}}$ ) колеса,

$$S = \frac{P_{к1}}{g} \xi_1 \left[ \lambda_2^2 \cos \beta_\xi \left( \frac{d}{2} \cos \alpha_\xi + H \cos \gamma_\xi \right) v_c^2 + \lambda_\xi \left( H \cos \frac{d}{2} \cos \gamma_\xi \right) a_c \right] + G_1 f_1, \quad (13)$$

$$\frac{M_{вр}}{r_{д3}} = \frac{J_{A\xi} \lambda a_c}{r_{д3}} + P_{к3} \sin \varphi + P_2 \sin \mu_\xi \cos \nu_\xi \frac{O'T}{r_{д3}} + S' \frac{\cos \beta_\xi O'T}{tg \alpha_\xi r_{д3}}. \quad (14)$$

На рис. 7, б представлены графики, характеризующие усилия на ведущих и ведомом колесах вездехода в случае его столкновения одним из ведущих колес с препятствием порогового типа в зависимости от высоты препятствия.

Таблица 1

Математические модели по расчету усилий на колесах при столкновении с бугрообразным препятствием

Режим движения	Математическая модель
1. Столкновение переднего ведомого колеса с препятствием	$S = (P_1 + P_{к1})q + \frac{m_{к1} \lambda_1 a_c \xi_1}{\sin \alpha - f_1 \cos \alpha} - \frac{\lambda_1^2 m_{к1}}{r_{д1}} \rho v_c^2$ $\frac{M_{вр}}{r_{д2}} = 2m_{к2} \lambda_1 \left\{ \xi_1 \frac{\rho}{f_1} + \xi_2 \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \right\} a_c -$ $-\lambda_1^2 \left\{ m_{к1} \frac{\rho}{r_{д1}} - 2m_{к2} \frac{\chi}{\cos \beta} \right\} v_c^2 + \{(P_1 + P_{к1})q + (P_2 + 2P_{к2})f_2\}$
2. Столкновение заднего ведущего колеса с препятствием	$S = \frac{P_{к1}}{g} \xi_1 a'_{c1} + G_1 f_1, \text{ где } \xi_1 = 1 + \left( \frac{l_1}{r_{д1}} \right)^2, f_1 = \frac{\delta_{к1}}{r_{д1}}.$ $\frac{M_{вр}}{r_{д3}} = \frac{1}{\cos(\tau, \xi)} \left( \frac{J_{A\xi} \cdot \lambda_\xi}{r_{д3}^2} \cdot a_c + P_{к3} \cdot \sin \varphi + \right.$ $\left. + (P_2 \cdot \sin \mu_\xi \cdot \cos \nu_\xi + S' \cdot \cos \sigma_\xi) \frac{O'T}{r_{д3}} \right)$

Ведомое колесо при этом движется по горизонтальной поверхности без препятствий. Толкающее усилие, необходимое для его перемещения сравнительно незначительно и постоянно.

Также были проанализированы столкновения вездехода ведомым и ведущим колесом с препятствием бугрообразного типа и получены соответствующие математические модели (табл. 1). Особенностью таких

препятствий является отсутствие ребер и углов, свойственных препятствиям порогового типа. В процессе их преодоления колесо находится в контакте не с точкой, а образует пятно взаимодействия с поверхностью.

Для определенных режимов движения опытного вездехода ВСНД-2 с грузом усилия на колесах представлены на рис. 8.

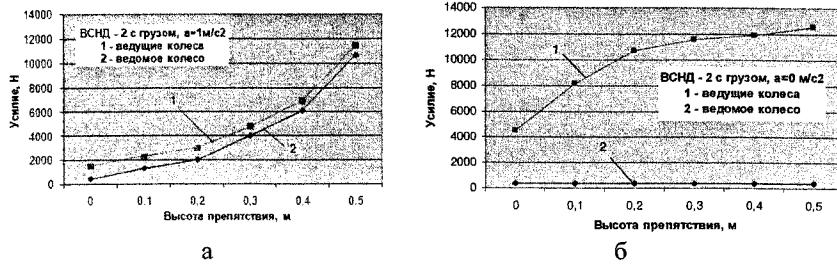


Рис. 8. Усилия на колесах при столкновении вездехода с бугрообразным препятствием: а – ведомым колесом; б – ведущим колесом

Сравнение графиков на рис. 7 и рис. 8 показывает, что при преодолении кочки колесо испытывает большие силы сопротивления, чем при преодолении препятствия порогового типа.

Расчет усилий на всех режимах движения производился на ПЭВМ с составлением алгоритмов и программ расчета, один из которых приведен на рис. 9.

Другие алгоритмы расчетов представлены в приложении к диссертации.

В четвертой главе представлены результаты аналитических исследований о влиянии конструктивных параметров вездехода и условий его эксплуатации на профильную проходимость при движении под пологом леса.

Высокая профильная проходимость, определяющая возможность движения вездехода по лесу, является обязательным условием функционирования лесопроизводственного производства.

В общем случае под проходимостью понимают эксплуатационное свойство машины, определяющее возможность ее перемещения в конкретных условиях, в том числе при преодолении различных препятствий. Поскольку условия эксплуатации для различных машин различны, то до сих пор нет единого определения проходимости для разных машин, очевидно, его и не может быть. Также различны показатели, по которым производится оценка проходимости.

При движении машины под пологом леса физический смысл понятия “профильная проходимость” заключается в нарушении возможности перемещения вездехода в выбранном направлении в результате его взаимодействия с непреодолимым препятствием – деревом. При этом возможность перемещения вездехода количественно можно оценить через вероятность преодоления участка местности, покрытого деревьями. Поэтому профильную проходимость, выраженную через вероятность преодоления участка лесистой местности, можно выделить как наиболее важнос

эксплуатационное свойство лесной машины и принять его в качестве критерия при обосновании параметров легких вездеходов.

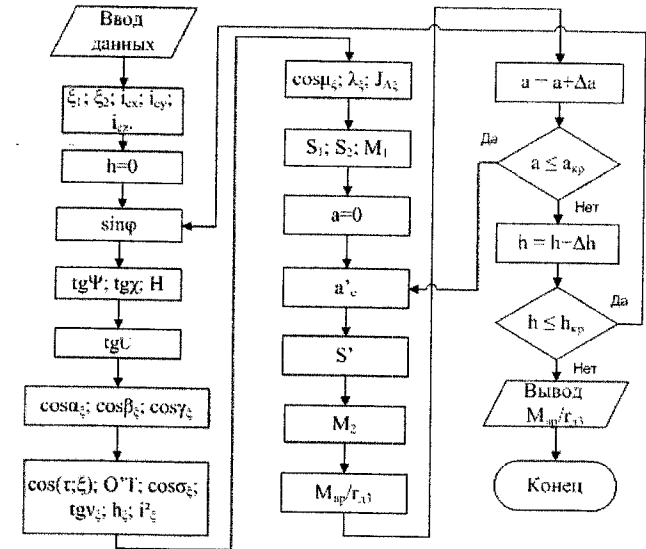


Рис. 9. Алгоритм расчета усилий на ведущих колесах вездехода при столкновении ведущего колеса с бугрообразным препятствием

В данной главе составлены математические модели для оценки проходимости легкого вездехода по участку местности под пологом леса с учетом его размеров, формы вездехода в плане, способа управления, маневренности и плотности расположения деревьев.

В качестве инструмента исследований предложен метод анализа, который основан на изучении взаимодействия горизонтальной проекции вездехода на плоскости при его перемещении под пологом леса с нанесенными на ней препятствиями – деревьями (рис.10), то есть на взаимодействии плоских фигур на плоскости. Поэтому этот метод предлагается называть методом планиметрирования.

В общем виде задачу можно сформулировать следующим образом: определить вероятность продвижения вездехода на расстояние  $L$ , если известно количество деревьев  $N$  на пробной площади  $S_0$ , средний радиус дерева  $R_0$  и ширина вездехода  $b$ .

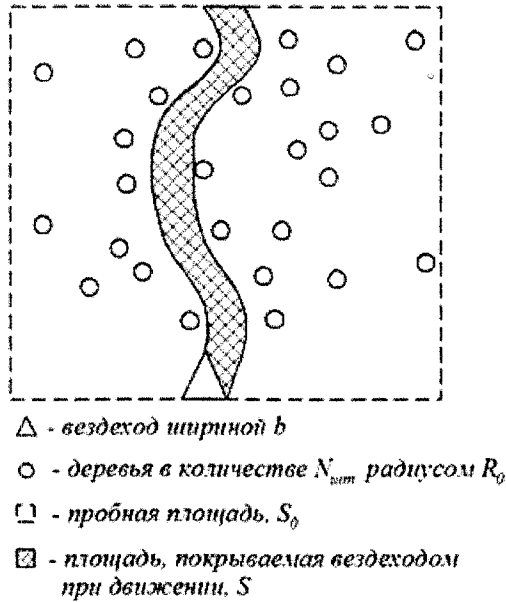


Рис. 10. Схема движения вездехода под пологом леса

Алгоритм решения задачи представлен на рис. 11.

В данном случае движение вездехода можно представить в виде цепочки перемещений, последовательно выполняемых с определенным шагом.

Причем при совершении очередного шага возможно движение как прямо, так и с поворотом налево или направо (рис. 12).

При этом движение возможно лишь в том случае, если на пути вездехода не будет деревьев.

Также вездеход может быть ограничен в совершении маневров, когда он останавливается при встрече с первым же деревом, а может обладать повышенной маневренностью, когда при встрече с деревом он может сделать один шаг назад, выбрать новый путь и продолжить движение.

Решение задачи основано на том, что вероятность отсутствия точечных препятствий  $P(0)$  или деревьев при  $R_0 = 0$  на площади  $S$ , которую покрывает вездеход при движении, составляет  $e^{-S \cdot \rho}$  или

$$P(0) = \frac{1}{e^{S \cdot \rho}}, \quad (15)$$

где  $\rho = \frac{N}{S_0}$  – плотность деревьев на участке. Если же  $R_0 > 0$ , но  $R_0 \ll b$ , что больше соответствует реальности, задачу можно свести к случаю, когда  $R_0 = 0$ , считая ширину вездехода, равной  $b_0 = b + 2R_0$ .

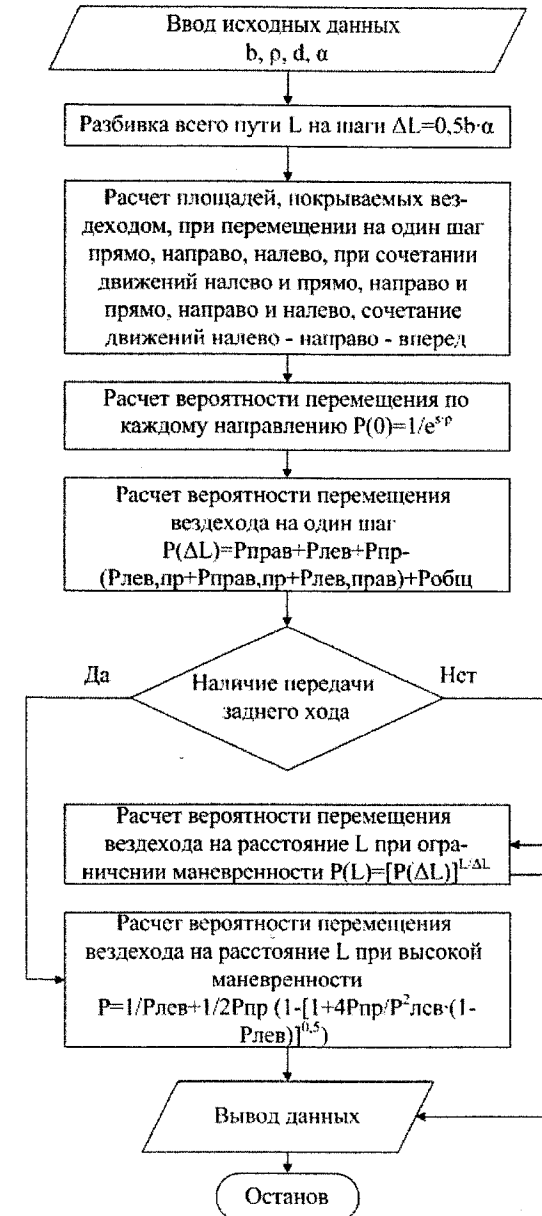


Рис. 11. Алгоритм решения задачи по определению вероятности преодоления участка местности под пологом леса

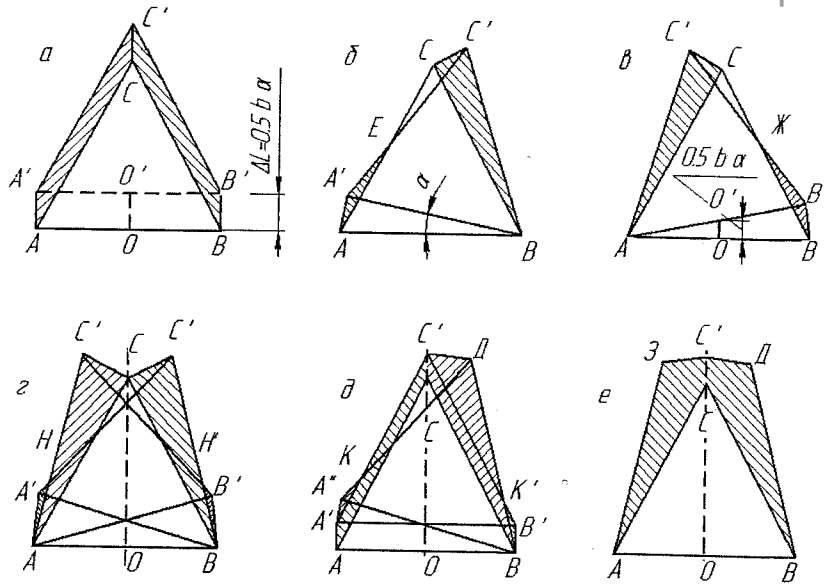


Рис. 12. Схемы возможных перемещений трехколесного вездехода при расчете вероятности сдвига на один шаг: а – движение прямо; б – движение направо; в – движение налево; г – налево и направо; д – направо и вперед (или налево и вперед); е – направо, налево и вперед (заштрихованы зоны, свободные от деревьев для осуществления перемещения вездехода)

Как отмечено выше, перемещения вездехода на расстояние, равное  $\Delta L$ , можно достичь тремя способами: движением вперед на  $\Delta L$ ; поворотом налево относительно заднего левого колеса; поворотом направо относительно заднего правого колеса. При этом в соответствии с теорией вероятностей для вычисления вероятности сдвига на один шаг хотя бы в одном из направлений необходимо знать вероятности сдвига вперед, налево и направо, а также вероятности сдвига в двух и всех трех направлениях (рис. 12, вариант трехколесного вездехода).

Расчет вероятности перемещения на один шаг  $P(\Delta L)$  ведется по формуле вероятности суммы совместных событий:

$$P(\Delta L) = P_{\text{прав}} + P_{\text{лев}} + P_{\text{пр}} - [P_{\text{лев,пр}} + P_{\text{прав,пр}} + P_{\text{прав,лев}}] + P_{\text{общ}}, \quad (16)$$

где  $P_{\text{прав}}, P_{\text{лев}}, P_{\text{пр}}, P_{\text{лев,пр}}, P_{\text{прав,пр}}, P_{\text{прав,лев}}, P_{\text{общ}}$  – соответственно вероятность перемещения вездехода на один шаг направо, налево, прямо, сочетание движений налево и прямо, направо и прямо, направо и налево, сочетание движений налево, направо и вперед.

Для определения вероятности перемещения на один шаг необходимо рассчитать площадь, покрываемую вездеходом при перемещении в каждом направлении, подставить полученные значения площадей в формулу (15) и

произвести необходимые вычисления с учетом плотности расположения деревьев на участке. Затем полученные вероятности требуется подставить в формулу (16) для определения вероятности суммы совместных событий и рассчитать вероятность совершения одного шага.

В итоге получена зависимость для расчета вероятности перемещения трехколесного вездехода на один шаг

$$P(\Delta L) = 2e^{-0,5b_0^2\alpha\left(\frac{1+3\sqrt{3}\alpha}{1+\sqrt{3}\alpha}\right)\rho} + e^{-0,5b\cdot b_0\cdot\alpha\cdot\rho} + e^{-2b\cdot b_0\cdot\alpha\cdot\left(1+\frac{\alpha}{2}+\frac{\alpha^2}{8}\right)\rho} - 2e^{-b\cdot b_0\cdot\alpha\cdot\rho\left(1,25+\frac{\alpha}{2}+\frac{\alpha^2}{8}\right)} - e^{-b_0^2\cdot\alpha\cdot\left(1+\frac{\alpha\sqrt{3}}{2}\right)\rho}. \quad (17)$$

Как видим, параметрами, определяющими свободное движение вездехода при перемещении на один шаг, являются ширина вездехода  $b$ , плотность расположения деревьев  $\rho$  и их диаметр.

Как показывает анализ, для реальных значений входящих в формулу (17) параметров эта вероятность составляет более 90 %.

Для продвижения же на расстояние  $L$  необходимо последовательно сделать  $n = \frac{L}{\Delta L}$  таких шагов. Вероятность того, что ни на одном шаге движение не будет остановлено  $P(L)$ , определяется по формуле:

$$P(L) = [P(\Delta L)]^{L/\Delta L}. \quad (18)$$

Как показывают расчеты, вероятность преодоления участка леса при ограничении маневренности вездехода, что предопределяется отсутствием передачи заднего хода в его трансмиссии, составляет ничтожную величину в связи с возведением в высокую степень числа, меньшего единицы.

Таким образом, прекращение движения при первом же непреодолимом препятствии приводит к весьма малым вероятностям перемещения на большое расстояние.

Действительному движению больше соответствует задача о выборе пути заранее в пределах обзора местности водителем или, когда при возникновении на пути непреодолимых препятствий в виде деревьев вездеход может сделать один шаг назад с целью найти другой путь.

Возможность такого маневра обеспечивает наличие в силовой передаче вездехода заднего хода.

В работе доказано, что при высокой маневренности вездехода и, если  $P_{\text{лев}}, P_{\text{пр}} > 0,33$ , где  $P_{\text{лев}} = e^{-S_{\text{лев}}\rho}$ ,  $P_{\text{пр}} = e^{-S_{\text{пр}}\rho}$ , то вероятность  $P$  проезда машины на любое расстояние не зависит от этого расстояния и является решением уравнения

$$1 - P = (1 - P_{\text{лев}}P)(1 - P_{\text{пр}}P)^2. \quad (19)$$

В этом случае решение задается формулой

$$P(L) = \frac{1}{P_{\text{лев}}} + \frac{1}{2P_{\text{пр}}} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4P_{\text{пр}}}{P_{\text{лев}}^2} (1 - P_{\text{лев}})} \right), \quad (20)$$

движение вездехода при этом теоретически достоверно.

Структурно легкий вездеход может быть выполнен трехколесным, представляющим в плане треугольник, а также четырех- или шестиколесным, представляющим в плане прямоугольник. Вездеход, имеющий в плане прямоугольник, может быть выполнен как с жесткой рамой, так и с шарнирно-сочлененной (ШСР). Поворот вездехода с жесткой прямоугольной рамой осуществляется за счет поворота его передних управляемых колес, поворот вездехода с ломающейся рамой осуществляется за счет складывания полурам.

Поскольку при расчете вероятности преодоления участка местности под пологом леса фигурирует площадь, покрываемая вездеходом при движении, то была выдвинута гипотеза о влиянии формы вездехода в плане и способа его поворота на профильную проходимость.

В результате выполненного анализа получены математические модели (табл. 2) для оценки проходимости для различных условий движения и различных конструкций вездехода. В этом случае решение независимо от формы вездехода задается формулой (20), но составляющие этой формулы для разных вездеходов в плане будут различны, что предопределяет в итоге разные результаты для различных вариантов исполнения вездехода.

Таблица 2

Математические модели для сравнительной оценки профильной проходимости под пологом леса

Вариант исполнения вездехода	Математическая модель
Четырех- или шестиколесный с жесткой рамой	$P(L) = \frac{1}{P_{лев}} + \frac{1}{2P_{пр}} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4P_{пр}}{P_{лев}^2} (1 - P_{лев})} \right),$ <p>где <math>P_{пр} = e^{-S_1 \cdot \rho}</math>; <math>S_1 = (b + d)l</math>; <math>P_{лев} = e^{-S_2 \cdot \rho}</math>;</p> $S_2 = \frac{1}{2} \left[ a^2 \left( ctg \alpha + \frac{\beta}{\sin^2 \alpha} \right) + b^2 tg \alpha - \frac{a^2 \sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \cos \alpha} \right] + dl - S_0;$ $S_0 = ba; \beta = \frac{l}{bctg \alpha - 0,5a}.$
Четырех- или шестиколесный с шарнирно-сочлененной рамой	$P(L) = \frac{1}{P_{лев}} + \frac{1}{2P_{пр}} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4P_{пр}}{P_{лев}^2} (1 - P_{лев})} \right),$ <p>где <math>P_{пр} = e^{-S_1 \cdot \rho}</math>; <math>S_1 = (b + d)l</math>; <math>P_{лев} = e^{-S_2 \cdot \rho}</math>; <math>S_2 = S_{нов} + S_{сегм}</math></p> $S_{нов} = ab + 0,5a \left( b - 0,5bctg \frac{\alpha}{2} + \Delta + 0,5d \right)^2 - \left( 0,5b - \Delta tg \frac{\alpha}{2} \right)^2 ctg \frac{\alpha}{2}$ $S_{сегм} = \frac{l \sin \frac{\alpha}{2}}{2h} \left[ 2bh ctg \frac{\alpha}{2} + (h - \Delta)^2 + d \sqrt{\left( h ctg \frac{\alpha}{2} + \frac{b}{2} \right)^2 + (h - \Delta)^2 + h ctg \frac{\alpha}{2} + \frac{b}{2}} \right]$
Трехколесный	$P(L) = \frac{1}{P_{лев}} + \frac{1}{2P_{пр}} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4P_{пр}}{P_{лев}^2} (1 - P_{лев})} \right),$ <p>где <math>P_{пр} = e^{-S_1 \cdot \rho}</math>; <math>S_1 = (b + d)l</math>; <math>P_{лев} = e^{-S_2 \cdot \rho}</math></p> $S_2 = 0,5 a \left[ (l \sec \alpha + a ctg \alpha) \operatorname{cosec} \alpha + b \left( \frac{0,5}{\sin \alpha} - 1 \right) \right] + dl$

По представленным моделям для трех анализируемых вариантов исполнения вездехода были рассчитаны вероятности перемещения на 50 метров вездехода шириной  $b = 2,3 \text{ м}$ , длиной  $a = 3,5 \text{ м}$ .

Полученные данные свидетельствуют о том, что при высокой маневренности вездеходы имеют вероятность преодоления участка лесистой местности более 0,9 при плотности расположения деревьев не более 0,23–0,27  $\text{шт./м}^2$ , что говорит о том, что движение вездехода теоретически достоверно. Причем более высокую проходимость имеют вездеходы с треугольной рамой, т.е. трехколесные, далее идут четырех- или шестиколесные с жесткой прямоугольной рамой и немного уступают им четырех- или шестиколесные вездеходы с шарнирно-сочлененной рамой. Разница в проходимости нивелируется при снижении плотности расположения деревьев.

Для практических целей большую значимость представляет задача по определению ширины вездехода для заданной плотности расположения деревьев и вероятности преодоления участка местности под пологом леса.

Условие задачи можно интерпретировать следующим образом: известна плотность расположения деревьев  $\rho$  на участке лесистой местности, необходимо подобрать максимально возможную ширину вездехода  $b$  для заданной вероятности преодоления этого участка  $P$ , чтобы выполнялось условие

$$P = 1 - (1 - P_{лев}P)(1 - P_{пр}P)(1 - P_{пра}P). \quad (21)$$

Решая это уравнение и подставляя вместо радиуса дерева  $R_0$  его диаметр  $d$ , получаем выражение для определения ширины вездехода

$$b = \sqrt{1,202d^2 + \frac{1,628}{\rho} \cdot \ln \frac{P}{1 - \sqrt[3]{1 - P}}} - 1,705d. \quad (22)$$

Решение за счет округления получено с запасом по сравнению с точным.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований опытных экземпляров трехколесных вездеходов на высокоэластичных движителях в виде шин сверхнизкого давления (0,005–0,02 МПа).

Программа экспериментальных исследований включала в себя:

1. Снятие весовых, геометрических и статических характеристик вездеходов и движителей для использования их при проведении численных экспериментов.
2. Испытания вездехода на профильную проходимость на модельном участке леса с целью экспериментальной проверки математических моделей.
3. Исследование тяговых возможностей вездехода при движении по различным поверхностям с целью получения экспериментальных данных для проведения тяговых расчетов и анализа тяговых свойств.
4. Испытания вездехода на определенных режимах движения при преодолении препятствий порогового типа.

Для проведения экспериментальных исследований в соответствии с их программой были спроектированы и изготовлены два вездехода на пневматиках сверхнизкого давления, имеющие различную энергонасыщенность и разную структуру силовой передачи.

Общий вид опытных образцов вездеходов представлен на рис. 13.



а

б

Рис. 13. Общий вид опытных образцов вездеходов: а – ВСНД-1; б – ВСНД-2

Измерительная и регистрирующая аппаратура, использованная при испытаниях вездеходов, представлена на рис. 14. Основные параметры, измеряемые при испытании, – это пройденный путь, расход топлива и сила сопротивления движению.

Кроме аппаратуры, представленной на рис. 14, при проведении испытаний по снятию характеристик движителей использовался динамометр ДОСМ-3-1 для измерения нагрузки на колесо. Контроль давления воздуха в камерах производился цифровым индикатором давления DPI – 705.

Целью испытаний под пологом леса являлась проверка работоспособности вездехода в реальных условиях конкретного лесохозяйственного объекта. При этом методами оценки проходимости вездехода были приняты визуальное наблюдение и непосредственные измерения результатов движения: пройденного пути, времени движения, расхода топлива, по времени и длине пути рассчитывалась скорость движения.

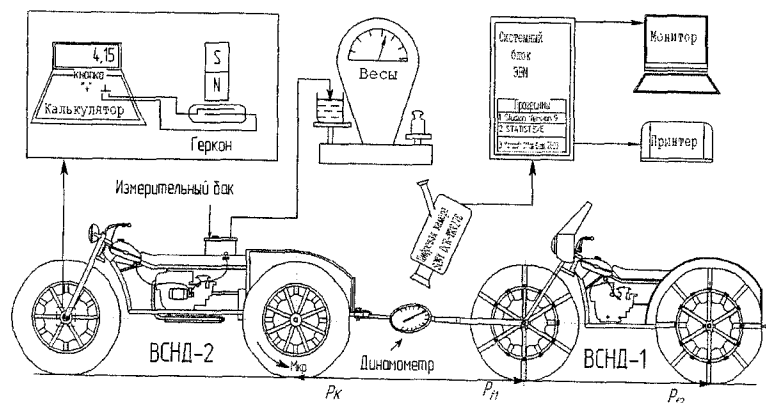


Рис. 14. Блок-схема измерительной и регистрирующей аппаратуры

Испытательная трасса, общая протяженность которой составляла 1000 метров, была разделена на 7 участков, границы которых определялись по изменению условий движения.

Во время испытаний по трассе было осуществлено 4 заезда – один подготовительный и три опытных. Целью подготовительного заезда являлась оценка условий движения вездехода и прокладка маршрута движения. Во время опытных заездов вездеход двигался по проложенному маршруту с максимальной возможной скоростью. При этом фиксировались передачи в КПП, используемые во время движения, пройденный путь, время движения и расход топлива. Исходя их пройденного пути и времени движения, рассчитывалась скорость движения.

Сравнительные данные прохождения всей трассы испытуемым вездеходом ВСНД-1 приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Данные прохождения трассы испытуемым вездеходом

Номер заезда	Длина трассы, м	Факт. длина пути, м	Коефф. удлин. трассы	Исп. перед. КПП	Время в пути, ч	Факт. скор., км/ч	Расход топлива, л/100 км	Технол. расход топл. л/т. км
1	1000	1189	1,189	1-2	0,113	10,5	15,3	0,30
2	1000	1210	1,210	1-2	0,112	10,8	15,1	0,296
3	1000	1175	1,175	1-2	0,105	11,2	15,8	0,31
Средние	1000	1191	1,191	1-2	0,110	10,82	15,73	0,302

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что цель эксперимента, состоящая в доказательстве возможности преодоления участка местности, покрытого лесом, достигнута. Вездеход продвинулся под пологом леса из точки А в точку В, расстояние по прямой между которыми составляло 1000 метров, пройдя при этом расстояние в 1191 метр со средней скоростью 10,82 км/ч и израсходовав при этом 0,1573 л топлива. В процессе движения вездеход преодолел участки лесистой местности без отклонений от маршрута с плотностью расположения деревьев до 0,4 шт./м<sup>2</sup>, пойму ручья с кочками высотой до 0,4 м, грунтовые неровности, в то же время участки местности с плотностью расположения деревьев от 0,4 до 1,0 шт./м<sup>2</sup>, поваленные деревья, крутые косогоры ему пришлось объезжать.

Определение моментов инерции колес вездехода производилось на экспериментальной установке, представленной на рис.15, а.

Согласно принятой методике проведения испытаний момент инерции колеса определялся из основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела при его разгоне под действием силы тяжести груза, соединенного нитью с испытуемым колесом. В результате было получено, что момент инерции переднего колеса составляет 13,6 кг·м<sup>2</sup>, заднего 15,8 кг·м<sup>2</sup>.

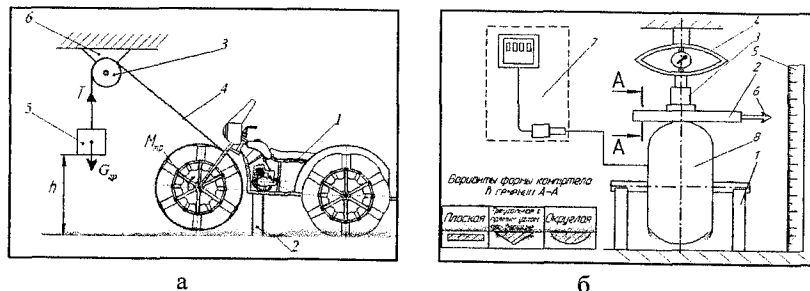


Рис. 15. Схемы экспериментальных установок: а – по определению момента инерции колес вездехода: 1 – вездеход, 2 – опора, 3 – блок, 4 – нить, 5 – груз, 6 – опора блока; б – по исследованию характеристик высокоэластичного движителя: 1– стойка, 2– контртело, 3– домкрат, 4– динамометр, 5– мерная линейка, 6– указатель, 7– цифровой индикатор давления, 8– испытуемое колесо.

Шинами высокоэластичных движителей на пневматиках сверхнизкого давления, как правило, являются резино–кордные оболочки, силовым элементом которых служит каркас, состоящий из нескольких слоев корда, отделенных друг от друга резиновыми прослойками.

На экспериментальных вездеходах были установлены шины, изготовленные в соответствии с техническими решениями, защищенными патентами РФ № 2192968, № 2242373, № 2292268, также в конструкции колес использовались отдельные элементы, защищенные патентами на полезную модель № 86142, № 84783, № 85401, № 84784, № 91937.

Исследование нормальной жесткости шин производилось с целью получения опытных данных для расчета нагрузок в ходовой части вездехода, формирующихся при движении по горизонтальной поверхности, а также при взаимодействии его движителей с препятствиями порогового или бугрообразного типа.

В связи с высокой эластичностью шин была выдвинута гипотеза о формировании разного динамического радиуса при взаимодействии колеса вездехода с различными типами препятствий: у препятствия порогового типа это будет треугольный профиль с прямым углом при вершине, у препятствия бугрообразного типа это будет профиль с определенным радиусом закругления, при движении по горизонтальной поверхности это будет плоская поверхность (рис. 15, б). Естественно, что на величину нормальной деформации должно существенно влиять давление воздуха в шинах.

Экспериментальная установка для снятия статических характеристик высокоэластичного движителя представлена на рис. 15, б. Для снятия характеристик испытуемое колесо 8 устанавливается своей осью на две стойки 1. Сверху на шину колеса устанавливается одно из трех контртел 2, на котором располагается домкрат 3 для создания давления на колесо и динамометр ДОСМ-3-1 4 для измерения этого давления. Приведенная погрешность измерения усилия составляет  $\pm 0,3\%$ . Контроль давления воздуха в камерах производился цифровым индикатором давления DPI – 705 7 с точностью до  $0,1 \cdot 10^{-3}$  МПа.

Давление воздуха в шинах при проведении опытов устанавливалось последовательно 0,005 МПа, 0,01 МПа, 0,015 МПа и 0,02 МПа. Контроль деформации колеса осуществлялся по перемещению указателя относительно мерной линейки с точностью  $\pm 1$  мм.

Зависимости статической нормальной деформации  $h_z$  экспериментальных шин сверхнизкого давления от нормальной нагрузки при разном внутреннем давлении воздуха  $p_w$  для трех видов контактируемых поверхностей показаны на рис. 16.

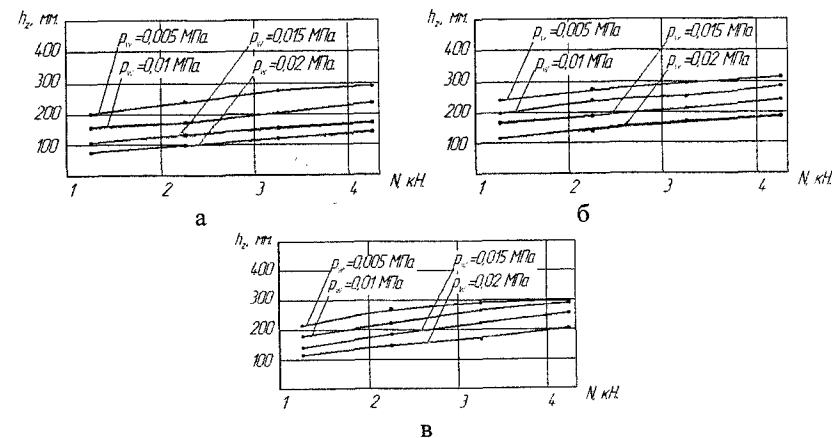


Рис. 16. Нагрузочные характеристики экспериментальных шин сверхнизкого давления при взаимодействии с различными поверхностями: а – с плоской поверхностью, б – с прямоугольной гранью, в – с округлой поверхностью

Как видно, нагрузочные характеристики идентичны по внешнему виду, но имеют количественные различия.

Исследование сопротивления движению при преодолении передним колесом препятствия порогового типа проводилось с целью проверки теоретических зависимостей по определению силы сопротивления движению, приведенных в главе 3, для конкретных режимов движения.

Сравнение усилий, действующих на переднее колесо, полученных экспериментальным и расчетным путем показало хорошую сходимость результатов. Отклонения экспериментальных данных от теоретических не превышает 9,8 %, что свидетельствует об адекватности полученных теоретических зависимостей.

В главе 6 изложена методология проектирования и расчета легкого трехколесного вездехода, изложены основные принципы выбора мощности двигателя, конструкции и параметров движителей, коробки перемены передач, главной передачи, позволяющие аргументированно производить выбор их параметров, выполнить общую компоновку вездехода и на ее базе спроектировать конструкцию рамы по взаимному расположению составляющих агрегатов вездехода и рассчитать ее на прочность.

Особое внимание было уделено обоснованию расчетных режимов и разработке методики расчета на прочность рамы вездехода.

При определении расчетных режимов движения, которыми следует руководствоваться при расчете на прочность колес и рамы вездехода, следует иметь в виду, что силы сопротивления движению вездехода формируются в точках контакта его колес, как передних, так и задних с опорной поверхностью с расположенными на ней препятствиями. Движущая же сила действует только на задних ведущих колесах и передается на передние через раму. Поэтому нагрузки, действующие на колеса вездехода и на раму, будут определяться не только режимом движения каждого из колес, но и их взаимодействием с другими колесами. Статистические характеристики кочек по их высоте, длине, плотности расположения и расстоянию между ними, приведенные в главе 2, позволяют рассчитать вероятность столкновения с кочками для вездеходов с различными параметрами движителей.

Вероятность столкновения колеса вездехода с кочкой при его прямолинейном движении без маневрирования можно оценить по формуле:

$$P = 1 - \frac{\sqrt{h(2r-h)} \cdot \rho t}{1 + d \rho t}, \quad (23)$$

где  $h, d, \rho$  – соответственно высота, длина и плотность расположения кочек;  $r, t$  – радиус и ширина колеса.

Исходя из вероятностного значения параметров, входящих в формулу (23), с учетом характеристик исследуемого вездехода:

$$P_{cp} = \int_{0,428}^{2,138} 0,505 \left( 1 - \frac{\sqrt{h(2r-h)}}{l+d} \right) dl + \int_{2,138}^{+\infty} \frac{1}{0,672} \varphi \left( \frac{l-1,409}{0,672} \right) \left( 1 - \frac{\sqrt{h(2r-h)}}{l+d} \right) dl, \quad (24)$$

где  $\varphi$  – локальная функция Лапласа.

Для исследуемого вездехода вероятность свободного без столкновения с кочкой движения колеса составляет 0,67, а вероятность столкновения составляет 0,33.

Вероятность одновременного столкновения колес с кочками можно оценить, применив формулу произведения вероятностей для независимых событий  $A$  и  $B$ ,

$$P(AB) = P(A)P(B). \quad (25)$$

Вероятность того, что все колеса вездехода могут в данный момент двигаться свободно без наезда на кочки

$$P_{своб} = P(ABC) = 0,67 \cdot 0,67 \cdot 0,67 = 0,301.$$

Вероятность столкновения одного из колес с кочкой

$$P(\bar{A}BC) = P(A\bar{B}C) = P(AB\bar{C}) = 0,33 \cdot 0,67 \cdot 0,67 = 0,148.$$

Вероятность столкновения с кочками одновременно двух колес при свободном третьем

$$P(\bar{A}\bar{B}C) = P(A\bar{B}\bar{C}) = P(\bar{A}B\bar{C}) = 0,33 \cdot 0,33 \cdot 0,67 = 0,073.$$

Вероятность одновременного столкновения всех колес с кочками

$$P(\bar{A}\bar{B}\bar{C}) = 0,33 \cdot 0,33 \cdot 0,33 = 0,036.$$

Таким образом, при прямолинейном движении без маневрирования около 30 % пути вездехода по местности, покрытой кочками, занимает свободное движение без столкновений, около 44 % пути – преодоление кочек одним из колес, около 22 % – столкновение с кочками одновременно двух колес и лишь 3,6 % – одновременное столкновение с кочками всех трех колес.

Истинному движению вездехода больше соответствует ситуация, когда водитель заранее оценивает условия движения и стремится сделать маневр передним колесом с целью объехать кочку. Это обстоятельство приведет к изменению режимов движения вездехода по времени, которое можно учесть через вероятность объезда кочки  $\alpha$ .

Тогда вероятность столкновения переднего колеса с кочкой можно рассчитать по формуле:

$$P(\bar{A}) = 0,33(1-\alpha), \quad (26)$$

а вероятность свободного движения

$$P(A) = 1 - 0,33(1-\alpha) = 0,67 + 0,33 \alpha. \quad (27)$$

В итоге получаем новые вероятности столкновения колес с кочками

$$P(ABC) = 0,30 + 0,148 \alpha,$$

$$P(\bar{A}BC) = 0,148(1-\alpha),$$

$$P(A\bar{B}C) = P(A\bar{B}\bar{C}) = 0,148 + 0,073 \alpha,$$

$$P(\bar{A}\bar{B}C) = P(\bar{A}B\bar{C}) = 0,073(1-\alpha),$$

$$P(A\bar{B}\bar{C}) = 0,073 + 0,036 \alpha,$$

$$P(\bar{A}\bar{B}\bar{C}) = 0,33(1-\alpha) \cdot 0,33 \cdot 0,33 = 0,036(1-\alpha).$$

Выполненный анализ показывает, что наиболее высокие нагрузки будут формироваться в колесах и в раме вездехода при наезде на кочки одновременно передним и одним из задних колес. При этом под передним колесом будет действовать толкающее усилие  $S$ , такое же усилие будет действовать на раму в точке крепления к ней оси переднего колеса и в точке крепления заднего моста к раме, сжимая ее. Под задними колесами будут действовать одинаковые усилия (в ведущем мосту установлен симметричный конический дифференциал), равные половине суммы усилий, рассчитанных для  $S$  и для  $\frac{M_{вп}}{r_{д2}}$ .

При расчете на прочность рамы вездехода следует иметь в виду, что подавляющее большинство элементов конструкции рамы ВСНД представляют собой стержни, отношение длины которых к максимальному диаметру поперечного сечения превышает пять. Это дает основание представить расчетную схему рамы как пространственную стержневую структуру (рис.17).



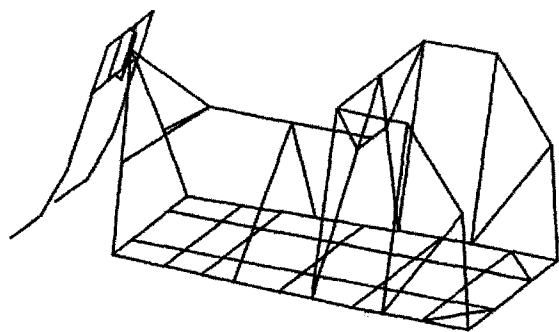


Рис.17. Рама ВСНД как пространственная стержневая структура

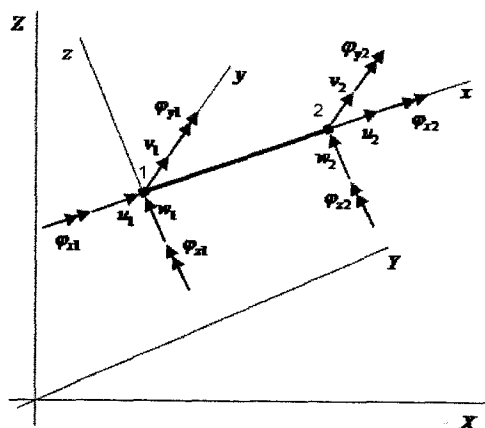


Рис.18. Пространственный конечный элемент (КЭ) с 6-ю степенями свободы

Для прочностного расчета данной конструкции естественным является выбор метода конечных элементов (МКЭ), так как в пределах принятой расчетной схемы и технической теории стержней МКЭ дает точное решение.

Выбранная расчетная схема рамы ВСНД предполагает использование пространственного конечного элемента с 6-ю степенями свободы в узле (рис. 18).

Для расчета рамы ВСНД как пространственной стержневой системы использовался программный комплекс SCAD версия 11.1 стержневой элемент 5. Для определения напряжений в стержнях рамы использовалась теория кручения и изгиба тонкостенных стержней замкнутого профиля, так как отношение толщины замкнутого профиля к длине средней линии намного меньше единицы.

Оптимизация конструкции рамы и ее расчет осуществлялся методом последовательных приближений, состоящим из нескольких шагов, когда каждый последующий шаг предпринимается на основе анализа результатов предыдущего. На первом шаге расчету подвергалась базовая конструкция рамы,

полученная на основе взаимного расположения основных узлов вездехода и опыта его проектирования, изготовления и эксплуатации. Конструкция данного варианта рамы (по тексту рама 1) и нумерация элементов стержней представлена на рис. 19.

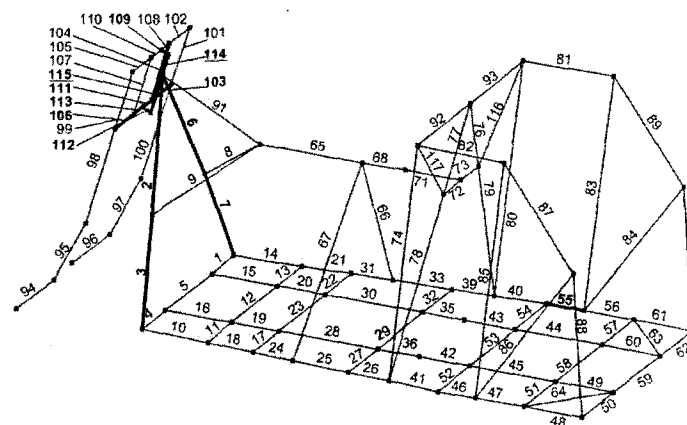


Рис. 19. Конструкция рамы 1 и нумерация стержней

Жирным выделены наиболее нагруженные элементы. Кроме этого варианта конструкции рамы были рассмотрены еще два (рама 2 и рама 3). На раме 2 крепление хребтового и Л-образного элементов рамы были разнесены по длине втулки оси поворота переднего колеса. Это позволило существенно снизить напряжения в наиболее нагруженных стержнях рамы (табл.4), но тем не менее они превышали предел текучести материала.

В связи с полученными результатами было принято решение об усилении рамы металлическими пластинами (рама 3). Результаты решения по этому варианту приведены в табл. 4, они свидетельствуют об обеспечении прочности элементов рамы.

Таким образом, поэтапным последовательным принятием решений разработана конструкция рамы, отвечающая условиям прочности.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Дальневосточный регион обладает значительными ресурсами для развития лесопродукционного производства и наращивания объемов заготавливаемых и перерабатываемых лесных продуктов и лекарственного сырья. Основным сдерживающим фактором выступает неразвитая транспортная инфраструктура, в частности, отсутствие надежных, экологически безопасных и высокопроходимых транспортных средств, способных перевозить заготовленные продукты из леса на пункты первичной переработки.

2. Анализ встречающихся в природе препятствий в условиях Дальнего Востока и их воздействий на вездеход показал, что наиболее трудными из них с

точки зрения проходимости и тяжести воздействия на конструкцию вездехода являются поверхности, покрытые кочками, лесистая местность с крупными деревьями, препятствия порогового или бугрообразного типа (пни, камни, поваленные деревья, кочки).

Таблица 4

Пошаговое изменение конструкции рамы и напряжения в ее наиболее нагруженных стержнях

Вариант конструкции рамы	№ наиболее нагруженного стержня	N (Н)	Mz (Н*М)	My(Н*М)	Mк(Н*М)	SigmaIII (МПа)
Рама 1	2,6	-5931,48	2107,17	-1543,11	353,8	570,6
	103	-1258,09	935,83	-820,69	-34,23	298,4
	106	6277,73	0,00	-2674,19	0,00	297,2
	111	-13607,50	0,00	3213,95	0,00	461,9
	113	-20333,70	0,00	-4287,98	0,00	461,9
	114	28675,00	0,00	-936,00	0,00	729,4
	116	-38229,00	0,00	956,00	0,00	946,2
Рама 2	100	-7240,20	1566,80	-1230,98	-213,82	413,55
	103	-2452,08	1051,82	870,93	-68,89	281,2
	106	8484,30	0,00	-1667,77	0,00	280,38
	111, 113	12216,10	0,00	836,85	0,00	453,73
	122	8124,86	0,00	-1931,34	0,00	423,82
	124	22466,80	0,00	-483,88	0,00	413,01
	127	-32446,10	0,00	-1309,25	0,00	277,08
Рама 3	98	-15186,00	535,36	-522,56	62,07	241,3
	103	-3303,80	797,85	745,25	-47,83	108,9
	106	24674,84	13,78	-840,88	-3,29	115,0
	111	7507,22	1,99	1037,84	-3,29	181,5
	112	3409,45	-4,34	-1473,19	-8,85	102,8
	113	24163,60	3,31	-389,09	-4,34	181,3
	122	-34057,10	-8,82	-818,35	1,89	114,9

3. Экспериментальные исследования статистических характеристик кочек как препятствий для движения вездехода показали, что:

– рассеивание высот кочек подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $m_h = 35,79$  см и средним квадратичным отклонением  $\sigma_h = 7,53$  см;

– расстояние между кочками наиболее точно можно представить двумя законами распределения: равномерным распределением на интервале (25 ÷ 90 см), которое можно представить уравнением прямой  $f(x) = 0,012$ , и нормальным распределением с параметрами  $m_r = 59,3$  см и  $\sigma_r = 28,3$  см на интервале (90 ÷ 140 см);

– рассеивание плотности расположения кочек подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $m_p = 1,757$  шт./м<sup>2</sup> и средним квадратичным отклонением  $\sigma_p = 0,335$  шт./м<sup>2</sup>;

– рассеивание длины кочек подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $m_l = 33,61$  см и средним квадратичным отклонением  $\sigma_l = 7,49$  см.

4. В диссертации получила дальнейшее развитие теория движения колесных машин в условиях бездорожья. В частности рассмотрено взаимодействие высокоэластичного колесного движителя, работающего в ведомом и ведущем режимах, с препятствиями порогового и бугрообразного типа, причем характеристики движителя и вездехода таковы, что движение по лесной почве происходит без ее разрушения, то есть без образования колеи; разработаны математические модели столкновения вездехода с данного типа препятствиями, позволяющие рассчитать усилия, действующие на колеса и раму вездехода при различных режимах его движения.

5. Выполненный анализ движения вездехода по поверхности, покрытой кочками, показывает, что вероятность свободного проезда без столкновения колес с кочками составляет 41,9 % при объезде передним колесом 80 % кочек, вероятность наезда на препятствие одним колесом составляет около 44 %, вероятность столкновения с препятствиями одновременно двух колес составляет 13 %, а вероятность столкновения с препятствиями всеми колесами составляет лишь 0,7 % при стремлении к нулю при повышении маневренности вездехода. Это позволяет сделать вывод о том, что наиболее тяжелым с точки зрения формирования нагрузок на ходовую часть вездехода является режим наезда на препятствия одновременно передним и одним из задних колес и рекомендовать его в качестве расчетного при прочностных расчетах колес и рамы вездехода.

6. Разработан новый метод анализа профильной проходимости вездехода при движении под пологом леса, основанный на изучении взаимодействия горизонтальной проекции вездехода на плоскости при его перемещении под пологом леса с нанесенными на ней препятствиями – деревьями. В качестве количественной характеристики профильной проходимости при этом предлагается использовать такой показатель как вероятность преодоления участка местности, покрытого лесом.

7. Математическое моделирование движения легких вездеходов под пологом леса позволило определить влияние конструктивных параметров вездехода и условий движения на профильную проходимость. Установлено, что факторами, лимитирующими профильную проходимость вездехода, являются его ширина, плотность расположения деревьев и их диаметр. Кроме этих факторов на профильную проходимость влияют маневренность (возможность движения задним ходом), форма вездехода в плане и способ его поворота.

8. В диссертации доказано, что при отсутствии возможности движения задним ходом вездеход при столкновении с первым же деревом прекращает движение, вероятность преодоления вездеходом участка лесистой местности в этом случае зависит от его протяженности и в целом ничтожна. При высокой же маневренности эта вероятность не зависит от длины участка, определяется шириной вездехода, плотностью расположения деревьев и их диаметром, при

наиболее вероятных значениях этих параметров движение вездехода теоретически достоверно.

9. Выполненные экспериментальные исследования опытных образцов вездеходов позволили получить данные для проведения численного эксперимента, подтвердили адекватность полученных математических моделей по расчету профильной проходимости вездеходов при движении под пологом леса, а также по определению усилий, действующих на колеса вездехода при столкновении с препятствиями порогового и бугрообразного типа, а также позволили определить удельное сопротивление движению вездехода (в лесу  $f = 0,08$ , по мари  $f = 0,14$ ) и коэффициент сцепления колес с опорной поверхностью (в лесу  $\varphi_{лес} = 0,67$ , по мари  $\varphi_{мари} = 0,74$ ).

10. Разработанная в исследовании методология проектирования и расчета вездеходов позволяет обоснованно выбрать параметры основных его агрегатов, спроектировать движители в виде колес на пневматиках сверхнизкого давления, обосновать общую компоновку вездехода, разработать конструкцию и выполнить прочностной расчет рамы вездехода с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

11. Повышение эксплуатационных свойств легких колесных вездеходов для лесопромышленного производства в условиях Дальнего Востока обеспечивается:

- использованием трехколесной схемы исполнения вездехода, имеющей более высокую по сравнению с четырех- и шестиколесными вездеходами профильную проходимость при движении под пологом леса, а также обеспечивающей меньшую нагруженность ходовой части (рамы и колес) при движении по поверхности, покрытой кочками;

- установкой в силовой цепи вездехода передачи заднего хода, которая обеспечивает при столкновении с деревом возможность сделать один шаг назад для того, чтобы выбрать новое направление движения, при этом повышается профильная проходимость при движении под пологом леса;

- выбором ширины вездехода с учетом плотности расположения деревьев и заданной вероятности движения под пологом леса;

- выбором диаметра колес с учетом предельной высоты препятствия в виде кочек;

- расчетом рамы вездехода на прочность пошаговым последовательным принятием решений с использованием при расчете метода конечных элементов (МКЭ);

- внедрением в конструкцию легкого вездехода предлагаемых технических решений, выполненных на уровне изобретений.

12. Несмотря на то, что диссертация представляет собой законченное научное исследование, можно выделить перспективность дальнейших направлений работы. Прежде всего это касается развития теоретических основ расчета вездехода на прочность с учетом усталостных напряжений, изучения его вертикальной динамики, исследования технико-экономических показателей использования таких вездеходов на различных технологических операциях лесопромышленного производства.

По теме диссертации опубликовано 53 работы, основное содержание диссертации изложено в следующих из них:

**Статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК**

1. Иванов, Н.А. Вездеход для пчеловода / Н.А. Иванов // Пчеловодство. – 2003. – № 8. – С. 39–40.

2. Иванов, Н.А. Вероятностные модели кочек как препятствий для движения вездехода / Н.А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2005. – № 9. – С. 205–209.

3. Иванов, Н.А. Оценка проходимости трехколесного вездехода по лесистой местности / Н.А. Иванов, Е.В. Мясников // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2005. – № 5. – С. 45–53.

4. Иванов, Н.А. Влияние формы вездехода в плане на его профильную проходимость при движении по лесистой местности / Н.А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2005. – № 8. – С. 230–236.

5. Иванов, Н.А. Математическое моделирование параметров кочек как препятствий для движения вездехода / Н.А. Иванов, Е.А. Мясников, А.П. Гусев // Вестник КрасГАУ. – 2006. – № 14. – С. 109–113.

6. Иванов, Н.А. Классификация лесных препятствий и их воздействие на легкий вездеход / Н.А. Иванов // Лесное хозяйство. – 2006. – № 5. – С. 45–46.

7. Иванов, Н.А. Оценка вероятности преодоления вездеходом лесистой местности / Н.А. Иванов, Е.В. Мясников // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2006. – № 3. – С. 36–41.

8. Иванов, Н.А. Основы многоцелевого лесопользования на базе нового поколения лесной техники / Н.А. Иванов // Лесное хозяйство. – 2006. – № 1. – С. 39–40.

9. Иванов, Н.А. Профильная проходимость транспортно-технологических машин с шарнирно-сочлененной рамой под пологом леса / Н.А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2007. – № 5. – С. 141–149.

10. Иванов, Н.А. Сравнительная оценка профильной проходимости легких вездеходов под пологом леса / Н.А. Иванов // Известия СПб ГЛТА. – 2007. – № 180. – С. 180–185.

11. Иванов, Н.А. Моделирование параметров кочек как препятствий для движения вездехода / Н.А. Иванов, Е.А. Мясников // Известия СПб ГЛТА. – 2007. – № 179. – С. 82–92.

12. Иванов, Н.А. Выбор стратегии природопользования на рубеже эпохи / Н.А. Иванов, Ю.С. Салин // Вестник КрасГАУ. – 2008. – Вып. 18. – С. 135–146.

13. Иванов, Н.А. Новой стратегии природопользования – лесные машины нового поколения / Н.А. Иванов, Ю.С. Салин // Вестник КрасГАУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 136–138.

14. Иванов, Н.А. Синтез патентозащищенных конструкций движителей для вездехода на пневматиках сверхнизкого давления / Н.А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2009. – Вып. 11. – С. 181–187.

15. Иванов, Н.А. Профильная проходимость легких колесных вездеходов под пологом леса / Н.А. Иванов // Вестник КрасГАУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 207.

**Монографии**

16. Иванов, Н.А. Основы теории легких колесных вездеходов / Н.А. Иванов, М.В. Лейбович. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 256 с.
17. Иванов, Н.А. Лесной легкоход. Глава в монографии Измоденова А.Г. Силедия – 2: Начало учения. Лесное целенье. Лесной легкоход: Монография. Учебник. Справочник. Повествование. – Хабаровск: изд-во “РИОТИП” краевой типографии, 2008. – С. 427 – 467.

**Статьи в других изданиях**

18. Иванов, Н.А. Метод анализа профильной проходимости легкого вездехода / Н.А. Иванов // Актуальные проблемы лесного комплекса. Под ред. Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. – Брянск: БГИТА.- 2005. – Вып. 12. – С. 133 – 135.
19. Иванов, Н.А. Характеристика лесопродукционного производства как объекта транспортного обслуживания / Н.А. Иванов // Вопросы совершенствования технологий и оборудования в лесопромышленном комплексе и строительстве. Сб. научн. тр. Вып. 2 под ред. А.В. Лещинского. - 2003.- С. 43–46.
20. Иванов, Н.А. Обоснование параметров рулевого управления легкого вездехода / Н.А. Иванов // Вопросы совершенствования технологий и оборудования в лесопромышленном комплексе и строительстве. Сб. научн. тр. Вып. 2 под ред. А.В. Лещинского.- 2003.- С. 46–50.
21. Иванов, Н.А. Транспортные аспекты многоцелевого лесопользования / Н.А. Иванов, А.Г. Измоденов // Перспективы и методы повышения эффективности многоцелевого лесопользования на Дальнем Востоке: Мат-лы регион. конференции 26 февраля 2004 г.- Хабаровск.- Изд-во ДальНИИЛХ. – 2004. - С. 151–157.
22. Иванов, Н.А. Вездеходы на пневматиках сверхнизкого давления / Н.А. Иванов // Перспективы и методы повышения эффективности многоцелевого лесопользования на Дальнем Востоке: Мат-лы регион. конференции 26 февраля 2004 г. - Хабаровск. - Изд-во ДальНИИЛХ. – 2004. - С. 184–192.
23. Иванов, Н.А. Исследование взаимодействия колеса с пороговым препятствием / Н.А. Иванов // Региональные особенности ведения лесного хозяйства и лесопользования. Труды ДальНИИЛХ. – Вып. 37. – Хабаровск. – 2004. – С. 161–171.
24. Иванов, Н.А. Исследование проходимости вездехода по лесистой местности / Н.А. Иванов // Лесозэксплуатация. Вып. 5: Межвузовский сб. научн. трудов. Под ред. доц. Г.С. Смирнова. – Красноярск. – СибГТУ. - 2004. - С. 244–248.
25. Иванов, Н.А. Использование легких вездеходов при заготовке березового сока / Н.А. Иванов, Д.А. Шаморов // Лесные биологически активные ресурсы (березовый сок, живица, эфирные масла, пищевые, технические и лекарственные растения): Материалы II международной конференции. – Хабаровск. - ФГУ “ДальНИИЛХ”. - 2004. - С.124–127.
26. Иванов, Н.А. Организация территории подосочки дендропосов с использованием лесного легкохода / Н.А. Иванов, А.Г. Измоденов // Лесные биологически активные ресурсы (березовый сок, живица, эфирные масла,

пищевые, технические и лекарственные растения): Материалы II международной конференции. – Хабаровск. - ФГУ “ДальНИИЛХ”. - 2004. - С.128–129.

27. Иванов, Н.А. Транспорт для лесопродукционного производства (онь проектирования и эксплуатации) / Н.А. Иванов. – Хабаровск, 2005. – 56 с. – Де- в ВИНТИ 14.11. 2005, № 10–В20054.

28. Иванов, Н.А. Трицикл – незаменимый экологичный помощник человек в лесу / Н.А. Иванов, Б.Г. Апанасенко, А.Н. Иванов. – Хабаровск, 2005. – 5 с. Деп. в ВИНТИ 25.12. 2005, № 11–В2005.

29. Иванов, Н.А. Динамика ведущего колеса легкого вездехода / Н.А. Иванов // Лесозэксплуатация. Вып. 6: Межвузовский сб. научн. трудов. Под ред. доц. Г.С. Смирнова. – Красноярск. – СибГТУ. - 2006. - С. 87–92.

30. Иванов, Н.А. Модель взаимодействия ведомого колеса легкого вездехода с препятствием порогового типа / Н.А. Иванов // Проблемы перспективы лесного комплекса. Материалы межвузовской научн. практической конференции 26–27 мая 2005 г. – Воронеж. - Изд-во ВГУЛА. - 2005. - С. 48–53.

31. Иванов, Н.А. Модульно – блочное проектирование легких вездеходов / Н.А. Иванов // Актуальные проблемы лесного комплекса / Под ред. Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научн. технической конференции. Выпуск 11. – Брянск. – БГИТА. - 2005. - С.22–25.

32. Иванов, Н.А. Природным нетрадиционным и редким растениям экологичный транспорт / Н.А. Иванов // Нетрадиционные сельскохозяйственные лекарственные и декоративные растения.- № 1 (2). - 2005. - С.54 – 59.

33. Иванов, Н.А. Обоснование структуры силовой передачи легкого вездехода / Н.А. Иванов, Е.А. Мясников // Актуальные проблемы лесного комплекса. Под ред. Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. - Выпуск 12. – Брянск. БГИТА. - 2005. - С.136 – 138.

34. Иванов, Н.А. Экспериментальное определение момента инерции колес легкого вездехода / Н.А. Иванов, А.А. Землянов // Актуальные проблемы лесного комплекса. Под общей ред. Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 27. Брянск. – БГИТА. - 2010. - С.17 – 20.

**Патенты РФ**

35. Патент на полезную модель № 53224. Трицикл на пневматиках низкого давления / Иванов Н.А., Богачев А.П. Оpubл. 10.05.2006. Бюл. 13, – 3 с.
36. Патент № 2292268 РФ. Колесо низкого давления / Иванов Н.А. Захарычев С.П. Оpubл. 27.01.2007. Бюл. 3, – 3 с.
37. Патент на полезную модель № 84817. Вездеход на шинах сверхнизкого давления / Иванов Н.А., Богачев А.П. Оpubл. 20.07.2009. Бюл. 20, – 3 с.
38. Патент на полезную модель № 83134. Устройство для измерения длины пути / Иванов Н.А. Оpubл. 20.05.2009. Бюл. 14, – 3 с.
39. Патент на полезную модель № 83135. Устройство для измерения сил сопротивления движению / Иванов Н.А. Оpubл. 20.05.2009. Бюл. 14, – 3 с.
40. Патент на полезную модель № 84784. Колесо низкого давления / Иванов Н.А., Землянов А.А. Оpubл. 20.07.2009. Бюл. 20, – 3 с.

41. Патент на полезную модель № 85401. Колесо низкого давления / Иванов Н.А., Котов М.В. Оpubл. 10.08.2009. Бюл. 22, – 3 с.
42. Патент на полезную модель № 84783. Колесо снегоболотохода / Иванов Н.А. Оpubл. 20.07.2009. Бюл. 20, – 3 с.
43. Патент на полезную модель № 91937. Легкий колесный вездеход / Иванов Н.А. Оpubл. 10.03.2010. Бюл. 7, – 3 с.
44. Патент на полезную модель № 86299. Устройство для измерения момента трения / Иванов Н.А., Иванов В.А., Авдеев В.А., Захарычев С.П., Якименко В.А. Оpubл. 27.08.2009. Бюл. 24, – 3 с.
45. Патент на полезную модель № 86142. Колесо низкого давления / Иванов Н.А. Оpubл. 27.08.2009. Бюл. 24, – 3 с.
46. Патент № 2242373 РФ. Колесо вездехода / Иванов Н.А., Захарычев С.П. Оpubл. 20.12.2004. Бюл. 3, – 3 с.
47. Патент № 2192968 РФ. Колесо вездехода низкого давления / Иванов Н.А., Захарычев С.П. Оpubл. 20.11.2002. Бюл. 5, – 3 с.

Иванов Николай Алексеевич

Повышение эффективности  
малых транспортных средств для лесозэксплуатации обоснованием  
параметров и улучшением эксплуатационных свойств

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Подписано в печать 13.12.2012 г. Формат 60x84/16.  
Бумага писчая. Гарнитура “Таймс”.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,325.  
Уч.–изд. л. 2,0. Тираж 120 экз. Заказ № 13.

Отдел оперативной полиграфии издательства Тихоокеанского  
государственного университета.  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

A-1727