

1564263

На правах рукописи

БЕЛЯКОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СО СНЕЖНЫМ ПОКРОВОМ ЭЛАСТИЧНЫХ
ДВИЖИТЕЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Специальность 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



МОСКВА 1999

Работа выполнена в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории (снегоходных) вездеходных машин (ОНИЛВМ) Нижегородского государственного технического университета

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. ПРОФЕССОР

Я.С. АГЕЙКИН
(МОСКВА, МГИУ)

ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. ПРОФЕССОР

Г.М. КУТЬКОВ
(МОСКВА, МГАНУ им. В.П. Горюхины)

ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. ПРОФЕССОР

В.Н. НАУМОВ
(МОСКВА, МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ.

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ им. С.А. ЛАВОЧКИНА

Защита состоится "28" 01.08.99 1999 года в "14⁰⁰" часов на заседании
_____ Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана, 25, Москва, 2-ая Бауманская, дом 5.

Библиотеке Московского государственного

_____ заверенных гербовой печатью, про-

1564263

_____ 1999 года

11.00

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1564263

Беляков В. В. Взаимодействие

А.М. РОМАШКО

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для специальных машин, работающих в сложных дорожно-климатических эксплуатационных условиях, а во многих случаях просто на бездорожье и в экстремальных природных и техногенных чрезвычайных ситуациях, эксплуатационные свойства, определяются взаимодействием движителя с полотном пути. При этом одним из тяжелейших режимов движения является передвижение машин по снегу.

Снег и лед занимают особое место в механике материалов, образующих верхний слой Земли, планет Солнечной системы и их естественных спутников. При этом на планетах и спутниках Солнечной системы, наряду с водным снегом и льдом, имеют место неводные (аммиачный, метановый, углекислотный и пр.) снега и льды, а также в ряде областей на поверхностях наблюдаются дисперсные композиты из грунтово-снежных компонентов.

Присутствие снега и льда в природе, окружающей человека, оказывает большое влияние на его экономическую и практическую деятельность, а также на образ жизни населения ряда регионов Земли. Присутствие снега и льда на планетарных объектах Солнечной системы в перспективе затруднит их научное исследование и освоение. В условиях, когда полотно пути покрыто снегом, движение машин не только затрудняется, но в большинстве случаев исключается совсем.

Если теория колесных и гусеничных машин при движении по грунтам разработана относительно полно как отечественными, так и зарубежными учеными, то вопросы передвижения специальных машин на эластичных движителях по снегу освещены недостаточно, и тем более вопросы, связанные с движением по неводным снегам и минерально-снежным композитам. Специфические условия работы требуют уточнения и пересмотра целого ряда положений, особенно в области взаимодействия эластичного движителя со снежным полотном пути в общем случае, то есть при криволинейном движении.

В связи с этим *актуальным является создание обобщающей теории взаимодействия эластичных движителей со снежным покровом, включая неводные снега, а также с минерально-снежными композитами, которая базируется на формализованных пространственно-временных моделях поверхности движения и опорно-тягового аппарата машины на основе единых представлений о механическом отклике на внешнее воздействие и топологии их строения с учетом изменения во времени параметров состояния и структуры контактирующих объектов под действием внешних факторов как природного, так и техногенного характера.*

Цель работы. Решение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение, связанное с передвижением по снегу специальных транспортных машин, на основе дальнейшего развития теории взаимодействия эластичных движителей специальных транспортно-технологических машин со снежным покровом различного физико-химического происхождения и структуры строения, а также реализация разработанных теоретических положений при повышении мобильности (проходимости) колесных машин по снегу и минерально-снежным композитам на базе комплекса экспериментально-теоретических исследований системы «местность-машина» и конструкторских работ в области создания и совершенствования автогусеничной и вездеходной техники.

Объекты исследований. На разных этапах работы в качестве объектов исследований выбирались как колесные, так и гусеничные машины. *Колесные машины:* БТР-80, грузовой автомобиль ГАЗ-66, различные модификации полноприводного колесного шасси ГПИ-3901 с бортовым способом поворота, переменной колесной формулой и коэффициентом базы, полным весом от 7 до 9 тонн в зависимости от конструкции движителя, и разнообразные средства повышения проходимости к названной машине; легкая плавающая полноприводная 8x8 машина НГТУ-2901 с бортовым способом поворота. *Гусеничные машины:* НГТУ-1901 "Минилесовоз", НГТУ-1903 "Минитрелевщик" на эластичных ленточных гусеницах. Объекты: БТР-80, ГАЗ-66, НГТУ-2901 представлены в работе как машины, с которыми проводились исследования в ОНИЛВМ, а ГПИ-3901, НГТУ-1901, НГТУ-1903 рассматриваются в работе как машины в проектировании, изготовлении и испытаниях, которых принимал непосредственное участие автор диссертации.

Общая методология исследований. В теоретических исследованиях использованы методы аналитической механики, механики сплошных сред, механики сложных пространственных конструкций, механики разрушений, механики слоистых систем, механики контактного взаимодействия пространственных систем с ограниченными телами, механики волновых процессов в сложных пространственных

системах, теорий упругости и вязкопластичности, математики многомерных пространств и тензорного исчисления; численные методы решения систем дифференциальных уравнений и нелинейных алгебраических уравнений; разнообразные методы математического моделирования и оптимизации параметров. *Экспериментальные исследования* проводились на серийно выпускаемых машинах, экспериментальных образцах, а также специально созданных ходовых макетах и стендах

Научная новизна. Создана оригинальная обобщенная формализованная математическая модель пространственного контактного взаимодействия упругого эластичного движителя, в том числе и колесного, с дисперсным упруговязкопластичным материалом многослойного локального пространства поверхности движения, в том числе и снежным покровом, независимо от его физико-химической природы и структуры строения на основе четырехмерных пространственно-временных представлений о динамике системы “машина-местность”, которая учитывает пространственное разрушение полотна пути движителем и экскавационно-бульдозерно-фрикционный перенос материала опорного основания из зон контакта в межопорные области, а также законы формирования межопорных холмов и колеи в целом.

Разработана оригинальная обобщающая модель снежного покрова, в том числе и внеземного происхождения, как полотна пути для движения специальных транспортных машин, которая учитывает химическую природу снегообразующего вещества, изменение под действием природно-климатических и техногенных факторов физических параметров состояния снега (пространственную прочность, внешние и внутренние сцепление и трение, влажность, температуру), топологию сложения (зональность, слоистость, толщину массива, тип подстилающего основания) и наличие структурных неоднородностей в снежном массиве (дисперсность, минеральные примеси, настовые корки, внутри массивные ледяные прослойки и метелевые рельефные образования).

Создана оригинальная формализованная математическая модель колесного движителя, которая может быть распространена на любой тип опорно-тяговых механизмов независимо от их конструктивной конфигурации, в которой на основе теории пространственных систем многих тел, представленной в виде графа, описывается топология строения движителя, позволяющая учесть конкретные геометрические, кинематические и силовые характеристики конструкций движителей, а также на базе математического аппарата, описывающего фиктивные четырехмерные пространственно-временные континуумы, рассматривается отклик на внешнее воздействие и рассчитывается напряженно-деформационное состояние его элементов.

При решении научной проблемы на основе полученных экспериментально-теоретических результатов созданы обобщающие классификации поверхностей движения, опорно-тяговых движителей и задач их контактного взаимодействия, а также разработаны алгоритмы, вычислительные программы и методики расчета силы тяги, сопротивления движению и показателей проходимости специальных транспортно-технологических машин по снегу, в том числе и колесных, которые как позволили выявить влияние конструктивных параметров (число осей и их расположение по базе, параметры колеса и протектора) на тягово-сцепные свойства колесных движителей, так и определить их конкретные размеры и характеристики. Сформулирована и решена задача применения средств повышения проходимости для колесных машин и разработаны методы их расчета.

Квалификационная формула работы. В данной диссертационной работе на основе выполненных автором экспериментально-теоретических исследований, *осуществлено решение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение, связанной с вопросами передвижения специальных транспортных машин на эластичных колесных движителях по снежному покрову различного физико-химического происхождения и топологии строения*, основные теоретические положения которой могут быть распространены на любые варианты взаимодействия различных по типу и конструктивной конфигурации движителей автотракторной техники с опорными основаниями произвольного естественного и искусственного происхождения, а полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих образцов транспортно-технологических машин.

Основные положения, выносимые на защиту. 1) Из теоретических разработок - теория взаимодействия эластичных движителей специальных транспортно-технологических машин с деформируемым полотном пути; математические модели и закономерности взаимодействия различных типов эластичных движителей со снегом; гипотетические модели снежных покровов на основе неводных снегов и модели поверхностей движения на основе минерально-снежных композитов. 2) Из научно-мето-

дических разработок - методика выбора и оптимизации конструкционных параметров ходовой части, обеспечивающих проходимость по снегу специальных транспортно-технологических машин на эластичных движителях; метод расчета процесса и соответствующих параметров взаимодействия эластичных движителей специальных транспортно-технологических машин со снежным покровом, позволяющий производить выбор рациональных конструкционных параметров движителя на стадии проектирования и оптимальный выбор средств повышения проходимости для серийно выпускаемых машин. 3) *Из научно-технических разработок* – экспериментально-теоретически обоснованные пути повышения проходимости и созданные по результатам исследований новые конструкционные решения и практические рекомендации, направленные на повышение проходимости специальных транспортно-технологических машин по снегу и слабо несущим поверхностям движения.

Достоверность результатов. Проведенный комплекс экспериментальных исследований на серийных машинах, опытных образцах, специально созданных ходовых макетах и стендах подтвердил основные теоретические положения, методы и средства повышения уровня проходимости специальных транспортно-технологических машин на эластичных движителях по слабонесущим поверхностям движения, в том числе по различным снегам и минерально-снежным композитам.

Практическая ценность состоит в реализации теоретических разработок, методик расчетов, практических рекомендаций при совершенствовании существующих и создании новых конструкций эластичных движителей специальных транспортно-технологических машин и средств повышения проходимости к ним для обеспечения их эффективной работы на слабонесущих поверхностях движения, в том числе и на снежных различной химической природы, а также на поверхностях, представляющих собой механические смеси минеральных грунтов и снега.

Реализация работы. Результаты экспериментально-теоретических исследований по теме диссертации внедрены в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных (снегоходных) машин - ОНИЛВМ, в п/я А-7701, использованы при проведении НИОКР для АО "ГАЗ", Арзамасского машиностроительного завода, Заволжского завода гусеничных тягачей, АО "Нижегородлес", Управления лесами по нижегородской области, АО "Нижегородлестоп", Муниципального предприятия "СПАС НН". Результаты работы используются в учебном процессе на кафедрах "Автомобили и тракторы" и "Строительные и дорожные машины" Нижегородского государственного технического университета. Результаты работы вошли в научно-учебную коллективную монографию "Проходимость автомобилей", изданную в 1996 году в издательстве НГТУ, и в методическую разработку "Формулы и алгоритмы для решения задач по теории автомобиля", изданную в 1990 году в издательстве ГПИ (НГТУ). Основные положения работы "Проходимость автомобиля", в которую вошли результаты данной диссертационной работы используются в учебном процессе и в научно-исследовательской работе при выполнении дорожных испытаний автомобилей кафедрой "Автомобильная техника" ВАИ (г. Рязань).

Апробация работы. Отдельные результаты и основные положения докладывались на региональных научно-технических конференциях "Повышение эффективности проектирования, испытаний и эксплуатации автомобилей" (г. Горький, 1986, 1987, 1988 гг.); на седьмой научно-технической конференции молодых ученых Волго-Вятского региона (г. Горький, 1987г.); на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение надежности и экологических показателей автомобильных двигателей" (г. Горький, 1990 г.); на Международной научно-технической конференции "Повышение эффективности проектирования, испытаний и эксплуатации двигателей, автомобилей, вездеходных, и дорожных машин" (Нижний Новгород, 1994 г.); на Международной научно-технической конференции "100 лет Российскому автомобилю. Промышленность и высшая школа" (Москва, 1996 г.); на научно-технической конференции "Проблемы машиноведения" (Нижний Новгород, 1997 г.); на Международной научно-технической конференции "Механика машиностроения" (г. Набережные Челны, 1997 г.); на Международной научно-практической конференции "Развитие транспортно-технологических систем в современных условиях" (Нижний Новгород, 1997 г.); на Международной научно-технической конференции "Interstroimech-98" (г. Воронеж, 1998 г.); на научно-техническом семинаре, посвященном 60-летию кафедры "Автомобили и тракторы" НГТУ (Нижний Новгород, 1996 г.); на совместных заседаниях кафедры "Автомобили и тракторы" НГТУ и научно-технического совета ОНИЛВМ (г. Горький - Нижний Новгород, 1982-1988гг.). Ряд положений, вошедших в данную работу, рассматривались при защите кандидатской диссертации на заседании специализированного совета К053.15.10 в МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 1992 г.), научно-техническом семинаре кафедр М9 М10 МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва,

1991, 1999 гг.) и научно-техническом семинаре в в/ч 63539 (г. Бронницы, 1992 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликована 1 научно-учебная монография, 4 учебно-методических пособия, 38 научных работ и 6 отчетов по НИР.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех частей, в которых содержится восемь глав, общих выводов, списка использованной литературы из 644 наименований, четырех приложений. Общий объем работы 485 страниц, из них основной текст работы изложен на 305 страницах, 120 рисунков на 80 страницах, список литературы на 35 страницах, три приложения на 100 страницах, которые содержат 26 справочно-информационных таблиц на 77 страницах, описание объектов исследования на 10 страницах и 8 фотографий по тексту. Представлены акты внедрения на 11 страницах.

Общие замечания по диссертационной работе. Данная работа является логическим продолжением экспериментально-теоретических исследований, проводимых в НГТУ с 30-х годов (НИЛ “Снегоходные машины” под руководством М.В.Веселовского и в ОНИЛВМ с 1962 г. под руководством С.В.Рукавишникова, с 1982 – Л.В.Барахтанова), а также кандидатской диссертации автора “Методика расчета и анализа путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу” по специальности 05.05.03. “Колесные и гусеничные машины”, защищенной в совете КО53.15.06 МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1992 г. Данная работа выполнена в ОНИЛВМ, где автор работает с 1982 г. в должности младшего научного сотрудника, с 1989 г. – научного сотрудника, с 1991 г. старшего научного сотрудника, а с 1992 г. заместителем научного руководителя.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту, д.т.н., профессору Л.В. Барахтанову за оказанную поддержку и критические замечания, сделанные им при прочтении диссертации. Автор благодарит сотрудников ОНИЛВМ, СКТБ ТТМ, кафедр “Автомобили и тракторы” и “Строительные и дорожные машины”, а также сотрудников деканата автомобильного факультета и д.т.н. профессора А.П.Куляшова за оказанную помощь и поддержку на различных этапах написания и оформления данной диссертационной работы. Особую благодарность автор приносит декану автомобильного факультета НГТУ к.т.н., доценту Б.В. Савинову за оказанную моральную и техническую поддержку при подготовке работы к защите

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ЧАСТЬ 1. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА СПЕЦИАЛЬНЫХ МАШИН, КАК ФУНКЦИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЯ С МАТЕРИАЛОМ ПОЛОТНА ПУТИ: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАШИН С ПОЛОТНОМ ПУТИ. Приоритет разработки основных вопросов теории и расчета машин, работающих в условиях бездорожья, принадлежит в большинстве случаев отечественным ученым. При этом основные фундаментальные положения теорий взаимодействия движителей транспортно-технологических средств с полотном пути, проходимости машин в условиях пересеченной местности и теории автотракторных средств в целом разработаны российскими, украинскими и белорусскими учеными, среди которых исследователи Я.С.Агейкин, П.В.Аксенов, В.Я.Анилович, А.С.Антонов, Д.А.Антонов, Б.А.Афанасьев, Н.Р.Бриллинг, И.Б.Барский, Н.Ф.Бочаров, А.Ф.Батанов, В.Ф.Бабков, А.К.Бируля, Б.Л.Бухин, В.П.Бойков, В.Н.Белковский, Н.А. Бухарин, В.И.Баловнев, Л.В.Барахтанов, Ю.А.Брянский, В.Л.Бидерман, Г.Б.Безбородова, И.Н.Бескин, Р.К.Вафин, М.В.Веселовский, Н.Б. Веселов, В.Ф. Васильченко, В.П.Горячкин, Н.И.Груздев, Н.И. Гинзбург, В.В.Гуськов, М.И.Грифф, Л.А. Гоберман, А.А. Дмитриев, А.В.Денисов, Н.Е.Жуковский, В.А. Желиговский, Л.Ф.Жеглов, Н.А.Забавников, В.Г.Зимелев, П.И.Иванов, А.Ю.Ишлинский, М.В.Келдыш, М.К.Кристи, А.А.Крживицкий, И.В. Крагельский, В.И.Красеньков, А.С.Кузин, Н.Ф.Кошарный, Л.А.Кемурджян, А.П.Куляшов, В.В.Кашигин, А.А.Куприянов, В.И.Кнороз, В.Н.Кравец, И.Е.Ксенович, Г.М.Кутьков, М.А.Левин, Е.Д.Львов, А.С. Литвинов, Л.П.Легостин, Г.Р.Ленашвили, В.А.Малыгин, К.Ю.Машков, А.О.Никитин, В.Н.Наумов, А.Ф.Николаев, Ю.П.Новиков, Ю.И.Неймарк, П.И.Никулин, Б.П.Назаренко, А.Ф.Опейко, Ф.А. Опейко, С.В.Рукавишников, Ю.Л. Рождественский, Р.В.Ротенберг, В.Ф.Платонов, В.И.Панов, В.А.Петрушов, Ю.В.Пирковский, А.А.Полунган, А.А.Прокофьев, А.Ф. Полетаев, С.Д.Попов, В.М.Семенов, Л.В. Сергеев, Г.А.Смирнов, В.А.Скотников, А.П.Софиян, С.С.Саакян, М.Н.Троицкая, З.И.Талантова, Н.А.Ульянов,

Ф.Г.Ульянов, Б.С.Фалькевич, Я.Е.Фаробин, Н.А.Фуфаев, А.А.Хачатуров, Н.Я.Хархута, В.С.Цибин, И.С.Цитович, Е.А.Чудаков, Д.А.Чудаков, И.К.Чачхиани, М.П.Чистов, Н.А.Яковлев, Н.Н.Яценко и многие другие. Среди зарубежных авторов наиболее известны M.G.Bekker (М.Беккер), J.R.Elis (Дж. Эллис), A.Jante (А.Янте) Z.Japosi (З. Джанози), B.Nanomoto (Б. Ханомото), A.R.Reece (А.Рисс), A.Soltinski (А.Солтинский), Y.Taborek (Я.Таборек), J.Y.Wong (Дж.Вонг) и ряд других. В области теории транспортно-технологических машин и, в частности, вопросов взаимодействия их движителей с полотном пути, а также в решении задач проходимости машин достигнуты весьма существенные успехи, но, несмотря на это, стремление к непрерывному совершенствованию машин вызывает постоянную постановку новых проблем и требует новых теоретических разработок.

При изучении состояния вопроса было проанализировано более шестисот первоисточников по предмету диссертационной работы и смежных научных дисциплин. Большое число работ, не вошедших в библиографический список, было рассмотрено во вторичном переизложении, так как на сегодняшний день они являются раритетами или вообще утеряны. В связи с чем общее число исследованных научно-технических первоисточников составляет около одной тысячи. Исследования взаимодействия движителей транспортных и технологических систем с опорным основанием насчитывают более 200 лет, начиная с изучения вопроса деформирования грунтов французским ученым Ш.Кулоном (1733 г.), который ввел представления о грунте как о сыпучем теле, обладающем некоторой связью, а также отечественных исследователей Н.Фука и И.Комова (1785 г.), которые изучали взаимодействие жестких колес повозок на конной тяге с деформируемым полотном пути, установив, что сопротивление перекатыванию колес зависит от глубины колес, и заканчивая современными исследованиями взаимодействия движителей транспортно-технологических машин с донными грунтами шельфа Мирового океана и планетоходов с опорными средами планет Солнечной системы.

В данной главе процесс взаимодействия движителей машин с полотном пути был рассмотрен в абстрактно-функциональной форме. Выделено три составные части: *механика поверхностей движения, механика движителей и механика процесса контактного взаимодействия опорно-тягового аппарата машин с опорным основанием*. В связи с этим обзор ранее выполненных работ охватывает все три составные части. Отдельно проведен обзор работ по механике контактного взаимодействия движителей специальных транспортно-технологических машин со снежным полотном пути. Это сделано по причине существенного расхождения в физико-механических свойствах снега и минеральных грунтов.

Установлено, что *все ранее разработанные теории как по механике опорных оснований и движителей машин, так и по механике их контактного взаимодействия носят частный характер или охватывают узкие группы объектов исследований и не могут быть использованы как универсальные физико-математические инструменты для исследования с единых позиций системы "машина-движитель-полотно пути-местность"*.

Анализ работ по транспортному снеговедению показал, что снег, как наиболее сложная среда для передвижения специальных машин, широко распространен не только на Земле, но и за ее пределами, на других планетах. При этом он может иметь не только водную основу, но может быть образован из любых жидкостей и газов (из углекислоты, аммиака, метана и т.д.). Физика и механика поведения таких снегов под нагрузкой изучена весьма мало. При этом теория снежного покрова на основе водных снегов, разработанная в ОНИЛВМ, также носит частный характер и не может быть распространена на снега другой химической природы. В работах по физике материалов, из которых состоят поверхности движения, не рассматриваются композиционные смеси из снега (льда) и минеральных грунтов. Описание поведения таких систем под нагрузкой традиционными методами вызывает значительные сложности.

Аналитический обзор ранее выполненных работ по данной тематике и изучение процесса взаимодействия движителя с полотном пути в абстрактно-функциональной форме показал, что наиболее оптимальным методом построения единой теории взаимодействия движителей машин с опорными поверхностями является компиляция формализованных подходов, разработанных в механике пространственных конструкций с использованием тензорных представлений о напряженно-деформированном состоянии фиктивных четырехмерных тел и сред, в механике системы многих тел с описанием ее топологии на основе теории графов и в механике контактного взаимодействия материальных объектов на основе единства процессов, протекающих в области их контакта.

2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ КАК ФУНКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЯ С ПОЛОТНОМ ПУТИ. В данной главе, опираясь на

анализ работ по взаимодействию движителя с полотном пути, выполненный в предыдущей главе, и исследования тягово-скоростных и тормозных свойств, управляемости, маневренности, устойчивости, плавности хода, проходимости, вместимости и топливной экономичности на основе абстрактно-функциональной модели работы машины, как целой системы, а также обзора научно-технического материала по теории автотракторной и специальной техники, показывается, что *все эксплуатационные свойства транспортно-технологических машин независимо от их типа и характера использования, в первую очередь, зависят от параметров взаимодействия движителя с полотном пути*. Аналитический обзор ранее выполненных работ по данной тематике показал, что все параметры взаимодействия движителя с полотном пути могут быть сведены к двум основным обобщенным функциям взаимодействия, таким как сопротивление движению и сцепление движителя с опорным основанием.

Проведенный анализ ранее выполненных экспериментально-теоретических исследований по получению зависимостей или численных значений этих функций (коэффициентов сопротивления движению и сцепления) показал, что *все описывающие их математические формулы или их численные значения носят частный характер или объединяют близкие и весьма узкие родственные по свойствам и характеристикам группы контактирующих объектов*. Установлено, что наиболее целесообразный способ получения обобщенных функций взаимодействия основывается на формализации процесса взаимодействия движителя машины с полотном пути и получения обобщающих аналитических зависимостей с использованием четырехмерных математических моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние контактирующих пространственных систем.

Обе главы первой части диссертации показывают, что пригодные для практического использования результаты исследований взаимодействия движителей транспортно-технологических машин с полотном пути связаны с проведением различных испытаний, что является трудоемкой и дорогой задачей, практически не позволяющей охватить весь спектр дорожно-грунтовых условий, которые предполагаются для последующей эксплуатации проектируемых машин. В связи с чем комплексную оценку взаимодействия их движителей с полотном пути для определения мобильности (подвижности) и расчета проходимости с целью оптимизации конструктивных параметров ходовой части возможно выполнить только с помощью теоретических методов, причем разработка таких методов представляет очень трудоемкую задачу. При этом широкое разнообразие типов движителей машин и сред, с которыми они взаимодействуют, а также вариантов и режимов движения машин при эксплуатации подтверждает сложность проблемы и необходимость дальнейших специальных теоретических исследований процессов, происходящих при контактном взаимодействии опорно-тяговых систем с полотном пути на основе формализованных моделей движителя, поверхностей движения и контактного взаимодействия движителя и опорного основания.

3. ПОСТАНОВКА ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ. В соответствии с поставленной целью, проведенным реферативно-аналитическим обзором ранее выполненных работ и функциональным анализом процесса взаимодействия движителя с полотном пути и его влияния на эксплуатационные свойства транспортно-технологических машин определены следующие основные задачи данного исследования: 1) - на основе системного подхода исследование составных частей системы «машина-местность»: полотна пути, движителя, контактного взаимодействия и разработка обобщающих теоретических положений, описывающих составные части данной системы, включающих: 1.1) исследование закономерностей формирования поверхностей движения как пространственных несплошных сред и разработку принципов и методов формализации закономерностей поведения (сопротивление смятию и сдвигу, разрушение, изменение физико-механических параметров состояния) поверхностей движения независимо от типа и структуры материалов их составляющих, а также формы и характера внешнего воздействия; 1.2) исследование конструктивных особенностей опорно-тяговых механизмов машин и разработка теоретических положений и методов формализации описания конструкции и механического отклика на внешнее воздействие со стороны полотна пути; 1.3) исследование совместной работы движителя машин и опорного основания, а также разработка обобщающих методов описания задач контактного взаимодействия опорно-тяговых механизмов с полотном пути; 2) - исследование закономерностей формирования снежного покрова как полотна пути для движения транспортно-технологических машин на эластичных движителях; 3) - обоснование процессов, протекающих в снеге при внешнем природно-климатическом и техногенном воздействии, а также разработка аналитических методов прогнозирования и расчета изменения физических параметров состояния и топологию сложения снежного по-

крова; 4) - теоретическое исследование закономерностей формирования полотна пути на основе неводных снегов и их смесей с минеральными грунтами для движения специальных транспортно-технологических машин (планетоходов), а также разработка методов описания и расчета поведения их при внешнем воздействии; 5) - разработка обобщающей математической модели колесного движителя на основе принципов и методики формализации закономерностей работы опорно-тяговых механизмов независимо от их типа, конструктивных особенностей и реализуемых кинематических и нагрузочных режимов; 6) - исследование и обоснование процессов, происходящих как в полотне пути, так и в движителе при их взаимодействии в общем случае движения машины; 7) - развитие физически обоснованной теории взаимодействия эластичных движителей с деформируемым полотном пути на основе формализации процесса их пространственно-временного контакта с учетом взаимовлияния смятия, сдвига, разрушения и переноса материала опорного основания в контактной зоне; 8) - разработка математической модели взаимодействия колесного движителя со снежным полотном пути; 9) - реализация теоретических положений при разработке алгоритмов, вычислительных программ и методик расчета силы тяги, сопротивления движению и проходимости специальных колесных транспортно-технологических машин по снегу; 10) - исследование влияния конструктивных параметров и обоснование путей повышения проходимости колесных машин по снежному покрову; 11) - экспериментальная проверка теоретических разработок, методик расчетов, методов и средств повышения проходимости колесных машин; 12) - практическая реализация результатов исследований при создании новых и совершенствовании существующих конструкций колесных и специальных транспортно-технологических машин.

ЧАСТЬ 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛОТНА ПУТИ, ДВИЖИТЕЛЯ И ПРОЦЕССА ИХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

1. АНАЛИЗ ОПОРНО-ПРОФИЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ. В данной главе показаны основные положения механики сложных пространственных конструкций как прототипов поверхностей движения. Раскрыты соотношения, описывающие напряженно-деформированное состояние материального континуума пространственно-временной системы, а также физические уравнения состояния материала, из которого он состоит. Дана полная система уравнений граничных и начальных условий для описания механики сложных пространственных сред. Определены основные правила формализации пространственных систем и процессов, протекающих при внешнем воздействии на них.

Основываясь на фундаментальных принципах формализации поведения пространственных систем (сплошных сред), разработанных В.Н.Ионовым, П.М.Огибаловым, В.Л. Бердичевским и А.А. Ильюшиным (МГУ), на принципах формализации деформаций слоистых сред, разработанных И.И. Кандауровым (ВНИИГ), а также на принципах формализации процессов взаимодействия движителей машин с опорными основаниями, разработанных В.Н.Наумовым (МГТУ им. Н.Э.Баумана), в данной главе проведен анализ поверхностей движения транспортно-технологических машин как *несплошных сред* с точки зрения их строения (топологии) и механического отклика на внешнее воздействие. Формализация строения полотна пути включает четыре уровня: 1) *дисперсность строения* (газожидкая несущая фаза и твердая дискретная фаза); 2) *дисперсная композиция* (минеральная, минерально-биологическая, минерально-ледовая, минерально-строительная); 3) *слоистость и зональность сложения* (монослойные и полислойные, монозональные и полизональные); 4) *рельефность строения* (монорельефные и полирельефные). Формализация механического отклика подразумевает разделение сред на *недеформируемые* (жесткие) и *деформируемые* (обратимodeформируемые – упругие и упруговязкие, необратимodeформируемые – пластические, вязкие и их композиции). Используя отклик на внешнее воздействие и топологию строения как глобальные классификационные признаки, разработана классификация поверхностей движения. Полагается, что наиболее общей и сложной является поверхность движения, отвечающая следующему топологическому признаку – *полицельфная, полизональная полислоистая дисперсная композиция с вязкоупругопластичным откликом на внешнее воздействие*, а все остальные типы опорных оснований являются ее частными.

В основу построения моделей реальных трехмерных *пространственных* сред положено их фиктивное четырехмерное *пространственно-временное* представление. Здесь и далее символ R_4 обозначает четырехмерное *пространство Римана*, во взаимосвязь которому можно поставить трехмерное *Евклидово*

во пространство R_3 и локальное время t . По трем измерениям x^i ($i=1,2,3$) пространство Римана эквивалентно пространству Евклида и поведение среды (тела), помещенной в R_4 , подчиняется аналогичным законам, как и в R_3 . По четвертому измерению $x^0 = v^0 t$ среда имеет абсолютную жесткость, то есть взаимные перемещения частиц отсутствуют со всеми вытекающими отсюда последствиями для фиктивной четырехмерной среды. Здесь v^0 - коэффициент пропорциональности, физический смысл которого - скорость распространения возмущений в реальной среде, поэтому он имеет размерность скорости. Математически координатная линия x^0 - прямая, ортогональная к другим осям системы координат. Метричный тензор системы координат x^α ($\alpha=1,2,3,0$) имеет компоненты $g_{00} = -1$, $g_{i0} = 0$, остальные компоненты g_{ij} совпадают с соответствующими компонентами метричного тензора системы координат x^i ($i=1,2,3$). Согласно механике пространственных конструкций *соотношения между компонентами тензоров напряжений реальной среды (σ) и фиктивной (T)* имеют вид: $\sigma^{ij} = \left[T^{i0} T^{j0} (T^{00})^{-1} \right] - T^{ij}$. По формуле $v^i = v^0 T^{i0} (T^{00})^{-1}$ определяются компоненты тензора обобщенных скоростей перемещения частиц реальной среды или тела. По выражению $\rho = T^{00} (v^0)^{-2}$ находится плотность материала реальной среды или тела в рассматриваемой точке пространственной системы. Перемещения двух пространств связаны соотношениями при $i=\alpha=1,2,3$ - $u^i = w^\alpha$, а при $i \neq \alpha=0$ - $w^0 = \int_{t_0}^t v^0 \left\{ 1 - \left[1 - \tilde{v}^\alpha \tilde{v}_\alpha (v^0)^{-2} \right]^{1/2} \right\} dt$. При этом *уравнения движения*, описывающие динамику системы в пространственной среде $R_3(x^i)$, ($i=1,2,3$), где время независимо, имеют вид *дифференциальных уравнений второго порядка*, а в пространственно-временных средах $R_4(x^\alpha)$, ($\alpha=1,2,3,0$), где время - координата, они представляют собой *дифференциальные соотношения первого порядка*. Здесь u^i и w^α - компоненты векторов перемещений частиц реальной и фиктивной сред.

Описание реальных перемещений частиц снежного покрова как функции координат рассматриваемой точки локального пространства, осуществляется через *уравнения связей* вида $u^i = (u_0 + k^i x_i^{\mu_i}) C_{\alpha\mu i}$, где u_0 - некоторое бесконечно малое "жесткое смещение", до которого может опеределиться перемещение; k^i и μ_i - анизотропные параметры снежного покрова, являющиеся функциями скалярных и векторных параметров напряженно-деформированного состояния среды и носящие вариационный характер, позволяя настраивать модель на конкретный тип, $C_{\alpha\mu i}$ - направляющие косинусы вектора перемещений.

Используя метод формализованного подхода, разработанный в механике пространственных конструкций, для описания напряженно-деформированного состояния в данной главе строятся модели различных реальных сред от идеальноупругих до слоисто-дисперсионных вязкоупругопластичных с реологическими свойствами, во взаимосвязь которым ставятся различные типы реальных поверхностей движения. Вводятся прочностные критерии разрушения структуры реальной среды. Представлена классификация поверхностей движения и их характеристик

2. СНЕГ КАК ПОЛОТНО ПУТИ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН. Проведенное исследование опорно-профильных условий эксплуатации специальных машин позволяет с единых позиций, справедливых для всех типов поверхностей движения, построить модель снежного полотна пути. Опираясь на классическую теорию снежного покрова как полотна пути (В.Собенников, А.А.Крживицкий, И.В.Крагельский и др.), которая получила дальнейшее развитие в ОНИЛВМ НГТУ (М.В.Веселовский, С.В.Рукавишников, А.Ф.Николаев, В.И.Панов, В.А.Малыгин, Л.В. Бархатанов и др.), и на основе разработанной в предыдущей главе теории формализации опорных оснований вводится модель снежного покрова как *полирельефной анизотропной дисперсной слоистой термодинамической среды, образованной из вещества единой химической при-*

роды, но находящегося в разных агрегатных состояниях, и имеющей вязкоупругопластичный механический отклик на внешнее воздействие. При этом льдо- и снегообразующие вещества могут иметь не только водную природу (H_2O), но и любое другое химическое происхождение, например аммиак (NH_3), метан (CH_4), двуокись углерода (CO_2), окись углерода (CO) и прочие. Впервые при расчетах возможен учет влияния влажности снега и структурных неоднородностей (настовой корки и внутримасивных ледяных прослоек). Модель позволяет учитывать и реологические (вязкостные) свойства снежного покрова. Введение специальных уравнений позволяет рассматривать снежный покров как минерально-ледовую механическую композицию. При этом мерзлые грунты как минерально-ледовые композиции рассматриваются с позиций, разработанных Н.А.Цитовичем (МИСИ им. В.В.Куйбышева).

Модель снежного покрова независимо от химической природы льдообразующих веществ может быть описана системой уравнений, которая далее представлена по уровням формализации топологии.

Первый уровень - снежный покров, по определению, является средой, состоящей из минерально-ледовых полидисперсных композиций. Объединяя жидкую и газовую фазы в несущую, а твердую выделяя в дискретную, можно ввести в рассмотрение уравнения связей, определяющих дисперсность снежной среды: $C_d \approx 1 - (\rho_s - \rho_c) \rho_s^{-1}$, $C_n = 1 - C_d$. Здесь C_n , C_d - концентрации несущей и дискретной фаз. Если индекс дисперсности $I_{\%} = 0$, то минерально-ледовая дисперсная композиция обращается в минеральную дисперсную композицию и $\rho_s = \rho_m$, где ρ_m - плотность минеральных частиц композиции. Если $0 < I_{\%} < 1$, то имеет место минерально-ледовая дисперсная композиция и $\rho_s = \rho_m + \rho_d$, где ρ_d - плотность частиц льда. Если $I_{\%} = 1$, имеет место дисперсная композиция "чистый снег" и $\rho_s = \rho_d$. Причем плотность льда зависит от его химической природы. Здесь ρ_c - плотность дисперсной композиции (снега).

Соотношение, описывающее взаимодействие между фазами дисперсной среды, имеет вид: $\nabla_{\beta} [\rho_n C_n \zeta (\tilde{v}_n^{\alpha} - \tilde{v}_d^{\alpha}) (\tilde{v}_n^{\beta} - \tilde{v}_d^{\beta}) + \rho_n C_n \tilde{v}_n^{\alpha} \tilde{v}_n^{\beta} + \rho_d C_d \tilde{v}_d^{\alpha} \tilde{v}_d^{\beta} + (T_{\varphi} - \rho_n C_n \tilde{E}_n) g_{\alpha}^{\beta}] = 0$, где $\tilde{E}_n$ энергия несущей фазы, которая зависит от результирующих скорости движения фаз и скорости пульсации частиц дискретной фазы, здесь $\zeta = (1/2) C_d$. Скорости фаз вводятся соотношениями: $\tilde{v}_n^{\alpha} = \nabla_i w_n^{\alpha}$, $\tilde{v}_d^{\alpha} = \nabla_i w_d^{\alpha}$, где величины w_n^{α} и w_d^{α} - осредненные перемещения несущей и дискретной фаз дисперсной среды. В результате перемещений в снежном покрове возникают деформации, которые определяются дифференциальными уравнениями $\tilde{\epsilon}^{\alpha\beta} = (1/2) (\nabla_{\alpha} w^{\beta} + \nabla_{\beta} w^{\alpha} + \nabla_{\alpha} w^{\gamma} \nabla_{\beta} w_{\gamma})$.

Скорость распространения волны возмущения в снеге определяется твердостью S_H и влажностью W . При этом скорость распространения волн возмущений в снежном покрове приближенно может быть рассчитана по зависимости $v^0 = [(L + 2M) \rho_c^{-1}]^{1/2}$, где $L = v[(1+v)(1-2v)]^{-1}$, $M = S_H [2(1+v)]^{-1}$. Здесь $v = v(W, C_{n,d})$ - параметр снежного покрова, который меняется в весьма широких пределах в зависимости от структуры сложения и влажности: $v=0,1$ - зернистая сухая среда, $v=0,5$ - влажная пластичная среда.

Второй уровень - снежный покров по определению является средой, состоящей из минерально-ледовых полидисперсных композиций с вязкоупругопластичными свойствами, которые описываются физическими уравнениями, определяющими соотношения между компонентами тензоров деформаций и напряжений: $T_{\alpha\beta}^{(n)} = -C_d T_{\varphi} g_{\alpha\beta} + C_n \rho_n \zeta \tilde{E}_n g_{\alpha\beta}$; $T_{\alpha\beta}^{(d)} = -C_n T_{\varphi} g_{\alpha\beta}$; $(\nabla_i \tilde{\epsilon})_{\alpha\beta} = (1/2) \tau_m^{-1} \times \{(\nabla_i T)_{\alpha\beta} + \{[(2/3) \tau_m K_{\Sigma}^{-1} - 1](\nabla_i T_{\varphi}) + 2\tau_m \alpha (\nabla_i T_{\Gamma})\} g_{\alpha\beta}\} + \tilde{A} g_{\alpha\beta} + \tilde{C} \tau_{\alpha\beta} + \tilde{B} [D_{\alpha\beta}(T)]$. Здесь $T_{\alpha\beta}^{(n)}$ и $T_{\alpha\beta}^{(d)}$ - компоненты тензоров кинетических напряжений несущей и дискретной фаз, $T_{\varphi} = (1/3) T_{\alpha\beta} g^{\alpha\beta}$ - среднее кинетическое напряжение по всему массиву, $(\nabla_i T_{\varphi})$ - скорость изменения средних напряжений $T_{\alpha\beta}$ - компоненты тензора кинетических напряжений, $(\nabla_i T)_{\alpha\beta}$ - компоненты

тензора скоростей напряжений, $(\nabla, \tilde{\epsilon})_{\alpha\beta}$ - компоненты тензора скоростей деформаций, $D_{\alpha\beta}(T)$ - компоненты диватора тензора кинетических напряжений, (∇, T_r) - скорость изменения температура снега, α - коэффициент линейного температурного расширения, T_r - температура снежного покрова, K_{Σ} - жесткость снега, $\tau_m = (C_0 + T_{\varphi} \operatorname{tg} \varphi_0)$ - предел текучести фиктивной среды при сдвиге, C_0 - связность снега, $\operatorname{tg} \varphi_0$ - внутреннее трение, $\tau_{\alpha\beta}$ - касательные напряжения, которые являются функцией компонентов и инвариантов диватора тензора кинетических напряжений. В уравнении, определяющем скорость деформации снежного покрова, коэффициенты $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ зависят от функции пластичности среды, периода запаздывания деформации, кинематической вязкости, модуля упрочнения и периода релаксации среды, скорости объемного расширения снега, толщины снежного покрова, компонентов тензора скоростей неупругих деформаций и различных инвариантов, как тензора деформаций, так и тензора напряжений. Данная система уравнений, с одной стороны, требует выполнения вязкоупругопластичных свойств снега (третье уравнение), а с другой стороны, соблюдения топологии дисперсности снежного покрова (первое и второе уравнение)

Третий уровень - снежный покров по определению является средой, состоящей из минерально-ледовых полидисперсных композиций с вязкоупругопластичными свойствами слоистого сложения. Если на поверхность снежного покрова воздействует заданная нагрузка $f(\xi, \vartheta)$, то уравнения для определения перемещений, осредненных по всему многослойному массиву фиктивной четырехмерной среды, будут иметь вид: $w_1 = v_1 w_3, \quad w_2 = v_2 w_3, \quad w_3 = w_3^{[1]} \left[(T_{\varphi} \tilde{\epsilon}_{\varphi}^{-1})_{[1]} (T_{\varphi} \tilde{\epsilon}_{\varphi}^{-1})_{[2]} \right] (K_{[1]} K_{[2]}^{-1})^{1/2} + \dots + w_3^{[n-1]} \left[(T_{\varphi} \tilde{\epsilon}_{\varphi}^{-1})_{[n-1]} (T_{\varphi} \tilde{\epsilon}_{\varphi}^{-1})_{[n]} \right] (K_{[n-1]} K_{[n]}^{-1})^{1/2} + w_3^{[n]}, \quad w_0 = \int_{t_0}^t \tilde{v}_0 \left[1 - (1 - \tilde{v}^i \tilde{v}_i \tilde{v}_0^{-2})^{1/2} \right] dt$. Связь пе-

ремещений с дисперсностью среды задается соотношениями вида $w^a = w_n^a (1 + C_n) C_n^{-1}$, $w^a = w_n^a (1 + C_n) C_n^{-1}$. Здесь $w_3^{[k]}$, $(k=1,2,3, 4, \dots, n-1, n)$ перемещения от заданной нагрузки $f(\xi, \vartheta)$ на верхний слой среды мощностью $h_{[n]}$, состоящей из материала последнего слоя, $v_i \approx I_{\sigma}(T) [I_r(T)]^{-1}$, $(i=1,2)$ - коэффициенты тангенциального давления как функции отношения инвариантов: интенсивности нормальных к интенсивности касательных напряжений; $K_{[n]}^{-1} = k_{\text{кор}} \Psi_{[n]}$ - функции распределенной способности материала n -го слоя фиктивной среды $R_4(x^a)$; $\Psi_{[n]} = \{ \rho_n C_n [\nabla, \tilde{E}_n - \zeta (v_{ni} - v_{di}) \nabla, v_{ni}] + p_{\varphi} \nabla, C_n \} [\Omega (C_0 + T_{\varphi} \operatorname{tg} \varphi_0)]^{-1}$ - коэффициент пропорциональности, определяющий характер взаимной связи частиц и фаз рассматриваемой среды в n -ом слое; n - номер слоя, считая сверху. Передача нагрузки между слоями зависит от осредненной по всему массиву слоистой системы функции анизотропии структуры материала фиктивной среды, поставленной во взаимозависимость реальному снежному покрову. Площадь Ω приложения внешней нагрузки задается координатами ξ и ϑ системы отсчета, совмещенной с областью контакта, и является характеристикой модели взаимодействия.

Обобщающий уровень - снежный массив является средой, изменяющей свои свойства как во времени под действием природно-климатических условий, так и под действием внешней нагрузки. В связи с чем на этом уровне в рассмотрение вводятся уравнения, описывающие: критерий прочности снежного покрова, условие неразрывности, которые определяют закон сохранения массы, совместное условие баланса энтропии и сохранения энергии, необходимое в общей системе уравнений, когда материальный континуум подвергается необратимым процессам и фазовым переходам, а в случае разрушения снежного покрова должно выполняться условие переноса массы снега по всему объему снежного массива, задействованному в рассматриваемом процессе. Важнейшим звеном построения математической модели снежного покрова является введение уравнений связи параметров состояния снега. В целях сохранения общности модели для снега любой химической природы эти уравнения могут быть введены

в следующем виде:

-Для плотности снега в зависимости от температуры, влажности, деформации,

$$\rho_0 = H_r^{-1} \int_0^{H_r} \left\{ k_p \rho_w \left\{ 1 + \left[\ln \left(1 - | \Delta T_r |^m \right) \right]^{-1} \right\} \right\} dz, \quad \rho_w = \sum_{j=0}^s k_j w^j, \quad \rho_p = \sum_{j=0}^s d_j (\rho_0 e_r^{-1})^j.$$

Здесь $H_r = h_{[1]} + h_{[2]} + \dots + h_{[n]} = \langle h_{[n]} \rangle n$ - средняя толщина снежного покрова, e_r - относительная деформация - функция инвариантов тензора деформаций, j - степень аппроксимационного полинома, d_j, k_j - коэффициенты аппроксимирующих полиномов для снега водной природы, n - число слоев в массиве, w - влажность снега, $\Delta T_r = T_r T_{\Gamma(max)}^{-1}$ - изменение температуры снега, $m \approx 1 \pm k_p$ - показатель степени, ρ_0, ρ_w, ρ_p - плотности (исходная, в зависимости от влажности, после деформации). Влияние относительной деформации на плотность снега при различной начальной плотности показано на рис. 7.

-Для несущих и сценных свойств снежного покрова,

$$S_n = f(k_H, k_T) \exp \left[\sum_{j=0}^s a_j (k_p \rho_p)^j \right], \quad K_{\Sigma} = f(k_H, k_T) \exp \left[\sum_{j=0}^s b_j (k_p \rho_p)^j \right],$$

$$C_0 = f(k_H, k_T) \exp \left[\sum_{j=0}^s c_j (k_p \rho_p)^j \right], \quad \Phi_0 = f(k_H, k_T) \sum_{j=0}^s d_j (k_p \rho_p)^j.$$

Зависимость твердости, жесткости, связности и внутреннего трения снега от его плотности представлены на рис.4.

-Для влажности снега $w = 1 + \ln \left(1 - |T_r T_{\Gamma(max)}^{-1}|^m \right) = \sum_{j=0}^s f_j (k_p \rho_p)^j$. Влияние температуры на влажность снега показано на рис.5, зависимость плотности от влажности на рис.6.

-Для кинематической вязкости снега $\mu = D \operatorname{sh}^\gamma \left\{ \sin^2 \left\{ \pi \left[1 + \ln \left(1 - |T_r T_{\Gamma(max)}^{-1}|^m \right) \right]^\psi \right\} \right\} =$

$$= D \operatorname{sh}^\gamma \left[\sin^2 (\pi w^\psi) \right] = D \operatorname{sh}^\gamma \left\{ \sin^2 \left\{ \pi \left[\sum_{j=0}^s f_j (k_p \rho_p)^j \right]^\psi \right\} \right\}.$$

Здесь $\psi \sim 0,6317 k_T \approx 2\pi^{-1} k_T$,

$\gamma \sim 3,1929 k_p \approx \pi k_p$, $D \sim 6,2446 k_H (k_p + k_T) \approx 2\pi k_H (k_p + k_T)$, a_j, b_j, c_j, d_j, f_j - коэффициенты аппроксимационных уравнений для снега водной природы, $k_T = T_r^{-1}$ - коэффициент коррекции по температуре плавления (кристаллизации), $k_H = \Delta H_{298}^{[a]} \left(\Delta H_{298}^{[ab]} \right)^{-1}$ - коэффициент коррекции по энергии разрыва связей в молекулярной структуре, $k_p = \rho_{[ab]}^{-1}$ - корректирующий коэффициент по плотности материала неводного снега, ΔH_{298} - энергия разрыва связей при температуре 298,1 К. Влияние химии снега на деформационные свойства представлены на диаграммах рис.8.

Впервые, наряду с учетом влияния химии снега на его свойства при рассмотрении уравнений связи параметров состояния снежного покрова, составлены уравнения фазовых переходов и, как следствие, предложены зависимости для учета влажности, температуры и вязкости снега. Это существенным образом дополняет известную картину влияния плотности на параметры состояния снега.

Для случая равномерно перемешанной минерально-ледовой смеси предложена система определяющих уравнений связи, которые учитывают изменение деформаций и напряжений в среде в зависимости от концентрации минерального и ледяного компонента.

В случае вертикальной анизотропии и продольно-поперечной изотропии свойств среды, интенсивности деформаций (инварианты тензора деформаций) определяются соотношениями вида:

$$I_\epsilon^{[w]} = I_\epsilon^{[u]} + \left[k_{mc} \left(I_\epsilon^{[c]} - I_\epsilon^{[u]} \right) \right], \quad I_\gamma^{[w]} = I_\gamma^{[u]} + \left[k_{mc} \left(I_\gamma^{[c]} - I_\gamma^{[u]} \right) \right].$$

Здесь k_{mc} - коэффициент концентрации

минерально-ледовой композиции, который можно определить соотношением вида: $k_{mc} = [1 + k_c k_m (1 - k_m)]^{-1}$, где k_c и k_m - концентрации снежно-ледяного и минерального компонента, которые удовлетворяют условию $k_c + k_m = 1$. При этом диапазон изменения коэффициента концентрации имеет границы $0 < k_{mc} \leq 1$. Для минерально-ледовой композиции при вычислении вязкости должны использоваться следующие соотношения $D \sim 2\pi k_H k_{mc} (k_p + k_T)$, $\gamma \sim \pi k_p k_{mc}$, $\psi \sim 2\pi^{-1} k_T k_{mc}$. На рис.10 показаны теоретические результаты исследований поведения под нагрузкой минерально-снежной смеси на основе водного снега и среднезернистого кварцевого песка.

Предлагаемая модель позволяет произвести исследования особенности структурных характеристик снежного покрова (наста и глубинных ледяных прослоек) и их влияние на деформируемость снежного массива. Влияние структурных неоднородностей на процесс деформирования снежного массива представлен на рис.1. Расчеты поведения структурно-неоднородного снежного покрова под нагрузкой, на основе предложенной модели, подтвердили, что адекватность полученных теоретических расчетов экспериментальным данным колеблется в пределах 12...25%. При этом необходимо учитывать, что при наличии ледяных прослоек разброс точек относительно теоретической кривой будет более значительным, чем по сравнению со снежным покровом без наличия ледяных корок, так как учесть точную топологию строения снежного массива с ледяными прослойками практически невозможно.

Разработанная модель снежного покрова точнее отражает процесс поведения снега под нагрузкой в отличие от традиционной модели В.А.Малыгина (ОНИЛВМ, НГТУ), что видно из сравнения диаграмм на рис.1. Точность разработанной модели экспериментальным данным в среднем составляет 20% (рис. 2 и 3), что для такой неустойчивой среды как снег вполне приемлемо.

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛАСТИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ПОЛОТНОМ ПУТИ. Проведенное исследование снега как полотна пути позволяет перейти к рассмотрению второй и третьей составных частей системы "машина-местность", то есть на основе единых подходов к формализации пространственно-временных систем в данной главе рассматриваются вопросы формализации конструкции движителей машин и их контактное взаимодействие с полотном пути в различных режимах движения и нагружения.

Используя, как и при классификации поверхностей движения, в качестве основных признаков механический отклик на внешнее воздействие и топологию объекта (движителя или области контакта) в данной главе строятся классификации опорных и опорно-тяговых движителей и процессов их взаимодействия с полотном пути. Данные классификации, как и в случае с поверхностями движения являются методами формализации, позволяющими построить универсальные (формализованные) модели.

С точки зрения формирования отклика на внешнее воздействие движители могут быть как *недеформируемыми* (жесткими) и *обратимodeформируемыми* (упругими и вязкоупругими). Более разнообразна классификация движителей по признаку - топология строения. Большинство исследователей (М.Г.Беккер (Michigan University), Н.Ф.Кошарный (КАДИ), В.Н.Наумов, А.Ф.Батанов, Ю.Л. Рождественский (МГТУ им. Н.Э.Баумана), А.Г.Золотов (Институт теплофизики СО АН РФ) и др.) рассматривают конструкционные особенности тех или иных типов движителей, опуская при этом *формализованные признаки классификационного объединения различных групп опорных систем машин*. Можно выделить несколько таких признаков или уровней формализации. 1) *структура движителя по опорной зоне* (сплошные и дискретные), 2) *активность движителя* (пассивные, активные или тяговые и комбинированные), 3) *управляемость движителя* (изменением угла установки к вектору поступательной скорости, изменением скорости поступательного движения и комбинированный), 4) *пространственное расположение оси привода относительно продольной оси машины* (продольное, поперечное, угловое). Однако для построения адекватной модели взаимодействия движителя машины с полотном пути, при выполнении условия динамики машины в целом, она должна отражать конструкционные особенности различных типов опорно-тяговых механизмов, что может быть достигнуто путем формализации топологии строения движителей на основе модифицированного метода опонирования системы многих тел, разработанного Й.Виттенбургом (J.Wittenburg - "Technische Universität Hannover")

Модель движителя машины независимо от его типа и конструкции может быть описана системой уравнений, основные из которых представлены далее по уравнениям формализации топологии.

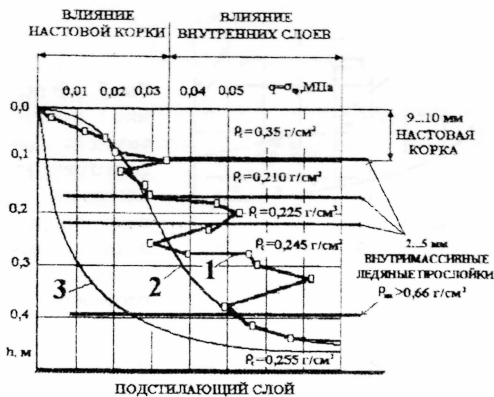


Рис. 1. Диаграммы влияния неоднородностей (настовой корки и ледовых глубинных прослоек) снежного покрова на его деформацию: 1 – экспериментальные данные, 2 – теоретическая кривая по разрабатываемой модели; 3 – теоретическая кривая по модели Малыгина-Баракханова

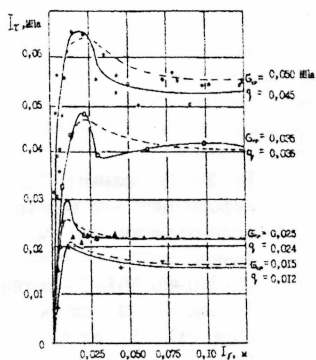


Рис. 2. Диаграммы сдвиговых напряжений от величины тангенциальных деформаций при различных нормальных средних напряжениях: точки – эксперимент; пунктир – расчет по формуле С.В.Рукавишникова; сплошная линия – разрабатываемая модель снега

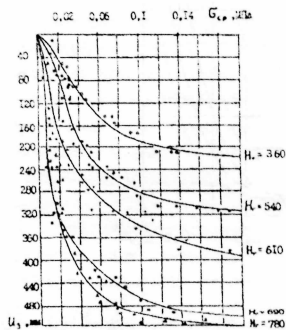


Рис. 3. Диаграммы «нагрузка-осадка»

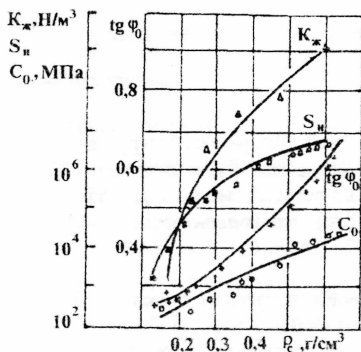


Рис. 4. Влияние плотности снега на его жесткость, твердость, внутренне сцепление и внутреннее трение

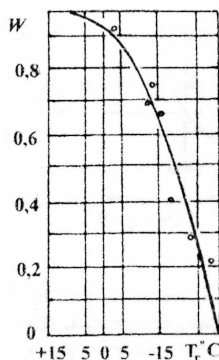


Рис. 5. Влияние температуры снега на его влажность

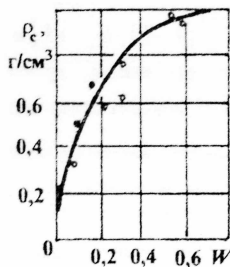


Рис. 6. Влияние влажности снега на его плотность

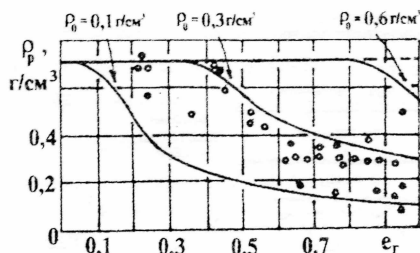


Рис. 7. Влияние относительной деформации на плотность снега при различной начальной плотности

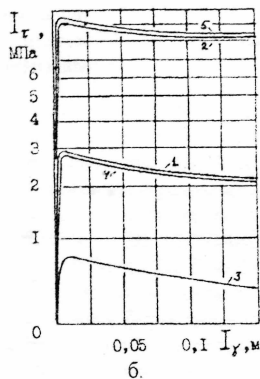
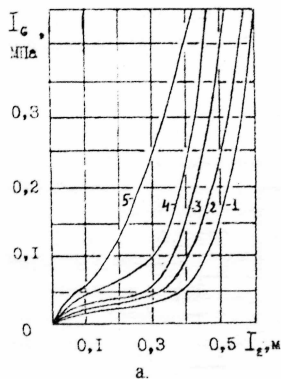


Рис. 8. Диаграммы "нагрузка-деформация" для водных и неводных снегов: а - смятие; б - сдвиг;
(1.- аммиак NH_3 , 2.- метан CH_4 , 3.- вода H_2O , 4.- двуокись углерода CO_2 , 5.- окись углерода CO)

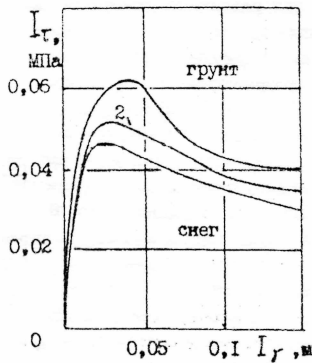
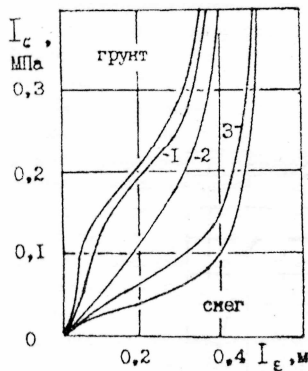


Рис. 9. Диаграммы "нагрузка-деформация" для минерально-ледовых смесей при коэффициенте концентрации: 1.- 0,1; 2.- 0,5; 3.- 0,9

При этом используется подход замены реальной пространственной конструкции движителя фиктивным пространственно-временным телом.

Первый уровень - введение физического уравнения, связывающего напряжения и деформации в теле эластичного элемента движителя, который контактирует с материалом полотна пути, и при-

ведением удельных нагрузок, возникающих в зоне контакта, к оси привода. $\tilde{\varepsilon}^{a\beta} = \Phi_0 g^{a\beta} + \Phi_1 T^{a\beta} + \Phi_2 T^{a\gamma} T_\gamma^\beta$, $T_\varphi = (1/3) T_{a\beta} g^{a\beta}$, $\Phi_0 \approx (1/2) T_\varphi G^{-1} [(2/3) G K^{-1} + 3 T_\varphi I_\tau^{-1} - (2/3) I_\tau T_\varphi^{-1} - 1] + \alpha T_\tau$, $\Phi_2 \approx (3/2) (G I_\tau)^{-1}$, $\Phi_1 \approx (1/2) G^{-1} (1 - 6 T_\varphi I_\tau^{-1})$, $K = (2/3) G (1 + \nu) (1 - 2\nu)^{-1}$. Здесь G , ν и K - модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент объемной деформации материала движителя, I_τ - интенсивность кинетических напряжений. Остальные обозначения аналогичны приведенным ранее. Универсальность данной системы, описывающей отклик на внешнее воздействие, связана с основополагающим принципом формализации системы «машина-местность», который утверждает, что независимо от типа движителя и физико-химической природы опорного основания процессы, протекающие в их контакте, едины, что проиллюстрировано на рис.10. Приведение удельных нагрузок σ_i в зоне контакта к результирующим реакциям P_i с переносом к оси привода и присоединением соответствующих реактивных моментов M_i , осуществляется в соответствии с правилами аналитической механики, то есть $P_i = \int_\Omega \sigma_i d\Omega$, $M_i = \int_\Omega \sigma_i d\Omega$, где Ω - площадь контакта движителя с полотном пути, а l_i - плечи приведения удельных нагрузок к оси привода. Параметры Ω и l_i есть функции конструкции машины и процесса взаимодействия движителя с полотном пути.

Второй уровень - связан с построением дифференциальных уравнений движения, кинематических соотношений, энергетических соотношений и других величин, нужных при исследованиях в динамике движителей и транспортно-технологических машин в целом, как систем многих тел. В связи с чем конструкция движителя любого типа может быть представлена в виде некоторой формализованной структуры (рис.11). Эта формализация конструкции движителя состоит из точек, называемых вершинами, и линий, соединяющих вершины и называемых ребрами. Вершины представляют тела системы (элементы движителя или элементы машины), включая инерциальный базис, а ребра представляют шарниры, соединяющие элементы конструкции. В шарнире объединены все силы взаимодействия между двумя смежными телами. Исходя из принципа возможных перемещений и полной возможной работы для системы из n материальных тел, предлагается записать уравнения движения на основе принципа

д'Аламбера в форме: $\sum_{i=1}^n \{ \delta \bar{r}_i [\bar{F}_i - m_i (\nabla_i^2 \bar{r}_i)] + \delta \bar{\pi} [\bar{M}_i - (\nabla_i \bar{L}_i)] \} - \delta q^T (\bar{k} \bar{X} + \bar{p} \bar{Y}) = 0$, где m_i - масса

i -го тела; вектор $\delta \bar{r}_i$ - представляет собой вариацию $\bar{r}_i$ - радиус-вектора центра масс тела относительно полюса, фиксированного в инерциальном пространстве; $\bar{L}_i$ - момент абсолютного количества движения относительно центра масс тела; $\bar{F}_i$ и $\bar{M}_i$ - главный вектор и главный момент внешних сил, действующих на i -е тело. Линия действия $\bar{F}_i$ проходит через центр масс тела. Эти силы и моменты связаны с контактными напряжениями от взаимодействия движителя с полотном пути. В последнем уравнении $((\bar{k}))$ и $((\bar{p}))$ - матрицы связи обобщенных координат с поступательной и угловой скоростями в шарнирах между телами, а $((\bar{X}))$ и $((\bar{Y}))$ - соответственно матрицы векторов внутренних шарнирных сил и их главных моментов, $((\delta q))$ - матрица вариаций обобщенных координат, через которые осуществляется связь топологии движителя с конструкцией машины в целом. Параметры $\delta \bar{r}_i$ и $\delta \bar{\pi}$, описывают вариации положения и ориентации i -го тела по отношению к инерциальному пространству. Связь между топологией конструкции движителя, параметрами, входящими в уравнения движения и тензорами взаимных координат положения тел системы по отношению к инерциальному базису (полотну пути) осуществляется через тензоры инцидентности и структурных взаимосвязей, (S) (U) . и имеет следующий вид: $((\delta \bar{r})) = U^T \{ (\bar{C} + \bar{Z})^T \times ((\delta \bar{\pi})) - ((\bar{k}))^T ((\delta q)) \}$, где $(\bar{Z})$, $(\bar{C})$ - тензоры взаимных координат положения тел системы с компонентами, зависящими от компонентов тензора инцидентности (S) . Методики построения зависимостей для определения величин, входящих в уравнение движения при форма-

лизованном построении модели поведения системы тел (движителя). подробно изложены в монографии Й Виттенбурга ("Динамика системы твердых тел" -М.: Мир, 1980). Данный метод формализации может быть распространен на любой тип движителя и даже на машину в целом, как систему многих тел.

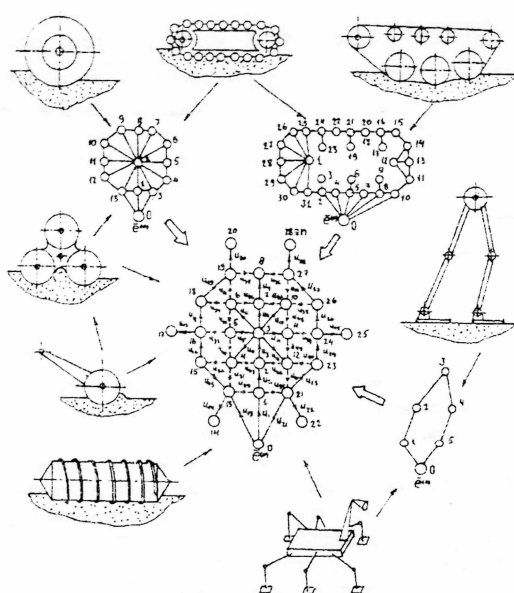
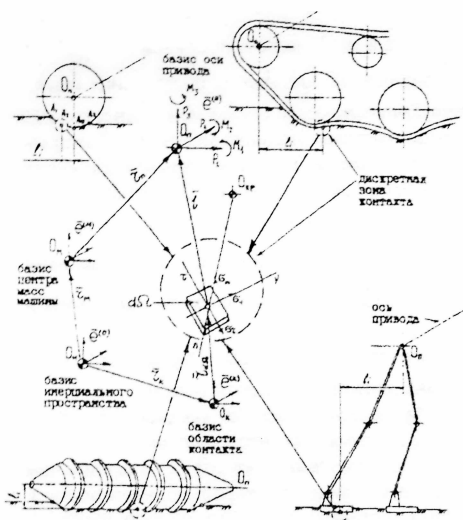


Рис.10. Схема формализации движителя машины по механическому поведению, иллюстрирующая единство процессов, происходящих в зоне его контакта с опорным основанием независимо от конструктивных особенностей (топологии строения)

Рис.11. Формализация в форме графа конструкции (топологии) движителя: Конструкция движителя → Формализация конструкции движителя в форме графа с замкнутыми цепями → Приведение графа к совокупности подсистем графов со структурой дерева и объединяющими разрезанными шарнирами

К контактным задачам относится большая группа вопросов, в том числе и вопросы взаимодействия машин с полотном пути. В связи с чем, для более наглядного понимания вопроса, в данной главе вводится полная классификация типов контактов взаимодействующих объектов. Эта классификация является методом формализации процесса взаимодействия, то есть *формализацией топологии строения области контакта и ее механического поведения*. При этом наряду с глобальными классификационными признаками (отклик на механическое воздействие и топология контакта) прочие классификационные признаки контакта объектов рассматриваются в соответствии с обзором, выполненным А.Г.Горшковым и Д.В.Тарлаковским (ВИНИТИ, 1990 г.). Такая классификация может быть, как и в случае классификации поверхностей движения, построена по уровням. Причем, каждый из предшествующих уровней содержится в последующих уровнях. Таким образом, при рассмотрении контактных задач взаимодействия пространственных систем можно выделить следующие уровни: 1) *по типу зависимости свойств контактирующих объектов от времени* (стационарные и нестационарные); 2) *по типу однородности пространственных свойств материалов контактирующих объектов* (изотропные, анизотропные и смешанные); 3) *по типу мерности рассматриваемой контактной задачи* (одномерные - линейные; двумерные - плоские; трехмерные - пространственные; четырехмерные - пространственно-временные или фиктивные); 4) *по типу механического поведения контактирующих объектов* (вязкоупругопластичные, вязкопластичные, упругопластичные, пластичные, вязкоупругие, упругие, смешанные); 5) *по типу силового воздействия одного контактирующего объекта на другой* (с сосредоточенным воздействием, с

распределенным воздействием; со смешанным воздействием); 6) по типу кинематического воздействия одного контактирующего объекта на другой (подуровень А - выделяет задачи, в которых кинематическое воздействие накладывается на нагрузку: подвижная и неподвижная, подуровень В - выделяет задачи, в которых кинематическое воздействие накладывается на зону контакта, в которой область взаимодействия в зависимости от условий и режимов взаимодействия может быть подвижной или неподвижной; в случае подвижных контактных задач можно выделить два случая движения области контакта: случай 1 - движение области контакта за счет расширения границ, которое носит название автомодельность, например внедрение в полупространство абсолютно жесткого сферического тела, случай 2 - движение за счет перемещения всей зоны контакта с изменением границ и пространственной формы области контакта, например взаимодействие эластичного движителя с деформируемым полотном пути, причем движение может быть как с проскальзыванием, так и без проскальзывания контактирующих объектов относительно друг друга); 7) по типу пространственного структурирования области контакта (со сплошной или дискретной областью контакта).

Согласно классификации, решаемая в диссертационной работе задача контактного взаимодействия движителя машины и опорного основания может быть классифицирована как наиболее общая и самая сложная, и которая может быть описана математической моделью как нестационарная, анизотропная, пространственно-временная, с перемещаемой с проскальзыванием дискретной областью контакта, и вязкоупругопластичным откликом одного из контактирующих объектов на подвижное распределенное силовое воздействие другого упругого контактирующего объекта.

На рис. 12 представлена формализованная расчетная схема элемента эластичного движителя и ее реальный аналог на примере единичного колеса.

Для аппроксимации контактной поверхности взаимодействия эластичных опорно-тяговых элементов движителя с деформируемым материалом локального полупространства полотна пути используется уравнение $\Omega(x^\alpha) = A_1 \prod_{\alpha=1}^n x_\alpha^{a_{1\alpha}} + \dots + A_k \prod_{\alpha=1}^n x_\alpha^{a_{k\alpha}} = 0$, ($\alpha = 1, 2, 3, 0$). Коэффициенты находятся

при совместном решении уравнений, описывающих снежный покров и движитель машины. При практических расчетах целесообразно выбирать аппроксимационное уравнение, не превышающее второй порядок, чтобы избежать влияния осцилляций в расчетах.

При построении модели взаимодействия движителя машины с полотном пути важным является возможность определения момента равновесия контактирующих объектов, то есть момента, когда процесс деформации завершен, и внедрение одного объекта в другой прекратилось. Равновесие контактирующих объектов определяется равенством напряженных состояний, но деформационные состояния при этом могут быть различны, что определяется различностью физико-химических свойств контактирующих систем. В общем случае контактирующие объекты могут взаимодействовать по некоторой пространственной поверхности Ω , тогда условие равновесия контактных напряжений от деформации контактирующих объектов, а также моментов от этих напряжений, становится недостаточным. Поэтому в рассмотрение вводится пространственное условие равновесия, которое строится на основе зависящего кубического инварианта, который для произвольной точки фиктивного пространственно-временного объекта определяется соотношением вида: $J_3(T) = I_1^3(T) - 3I_1(T)I_2(T) + 3I_3(T)$, где $I_1(T)$ - соответствующий инвариант тензора кинетических напряжений. Тогда функция взаимодействия для об-

ласти контакта примет вид: $\Phi = \int_{\Omega} \sum_{k=1}^2 [J_3(T)]_k d\Omega$, где k - определяет для какого контактирующего

объекта рассчитан инвариант ($k=1$ - движитель, $k=2$ - полотно пути). Таким образом, если $\Phi=0$, то имеет место равновесие. Если $\Phi \neq 0$, то продолжается деформация контактирующих объектов (движителя и полотна пути).

Используя подход, предложенный В.А.Желиговским (ГСИ) и разработанный А.Н.Ульяновым (СиБАДИ, ВИСИ) для описания кинематики многозонального (по числу зон скольжения) взаимодействия колесного движителя с полотном пути, и, развивая его на пространственную задачу контакта движителя с опорным основанием, сохраняя при этом формализацию подхода к рассматриваемой задаче, в работе вводится система кинематических уравнений связей для определения пространственных характеристик проскальзывания элементов движителя относительно полотна пути и связей с геометрией и

динамикой контакта движителя с поверхностью движения. На основе этих характеристик проскальзывания и учета конструктивных особенностей опорно-тягового аппарата машины вводится система уравнений, описывающая формирование высот контакта элементов движителя с материалом полотна пути с учетом его фрикционного течения и экскавационно-бульдозерных эффектов разрушения и переноса снега из зоны контакта в межопорную область. Используя известные уравнения по контактным напряжениям производится расчет реакций полотна пути на движитель, которые далее вводятся в общие уравнения движения машины.

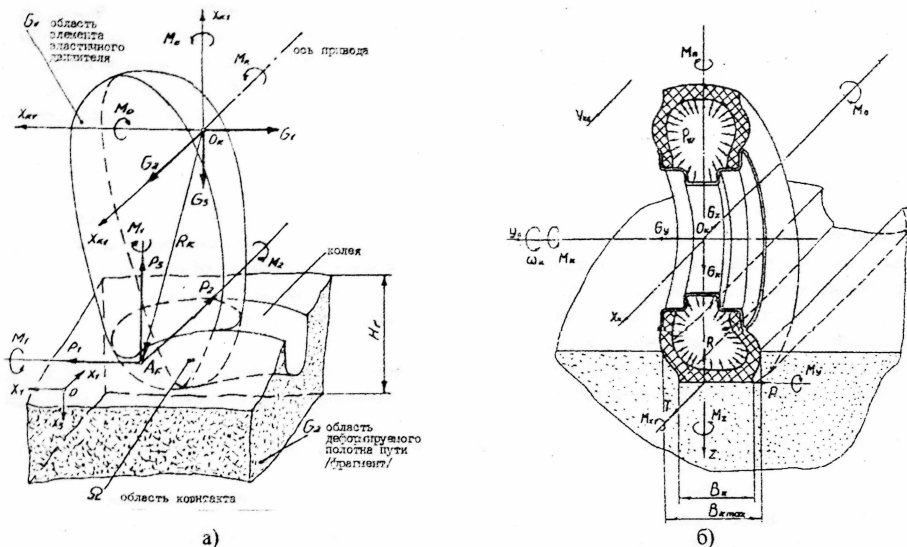


Рис. 12. Расчетная схема элемента эластичного движителя: а - формализованная, б - реальная

Наряду с подробным рассмотрением геометрии, кинематики, динамики взаимодействия движителя с полотном пути и процессов, связанных с разрушением и переносом материала полотна из зоны контакта, получены зависимости для определения *обобщенных характеристик взаимодействия*: - обобщенная функция сопротивления движению $\Phi_f = \Phi_{fR} + \Phi_{fдоп}$ и обобщенная функция сцепления

движителя с опорным основанием $\Phi_\varphi = (1/2)N^{-1} \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^N \Omega_{nm}^{-1} \int_{\Omega} [(\sigma_{\tau 12} \sigma_{(n)}^{-1}) \exp(-|\Phi_{nm}^{(s)}|)] d\Omega$. Здесь

$\sigma_{\tau 12} \approx (\sigma_{\tau 1}^2 + \sigma_{\tau 2}^2)^{1/2}$, где $\sigma_{\tau 1}$, $\sigma_{\tau 2}$ и $\sigma_{(n)}$ - соответственно, касательное, бинормальное и нормальное контактные напряжения, которые являются функциями компонентов тензора кинетических напряжений (T); $\Phi_{nm}^{(s)} = \theta_\tau^{-2} L_1 L_2 L_1^{-1} k_\phi$ - обобщенная функция проскальзывания элементов движителя относительно полотна пути; n - индекс борта машины, m - индекс элемента движителя по борту машины; $k_\phi = \{[\Phi_{\tau p}^{(1)}]^2 + [\Phi_{\tau p}^{(2)}]^2 + [C_0^{(1)} \sigma_{(n)}^{-1} + \text{tg } \Phi_0]^2\}^{1/2}$ - обобщенный коэффициент сцепных характеристик материала полотна пути, определяемый для случая продольно-поперечной анизотропии свойств материала, N - число элементов движителя; θ_τ - кинематический коэффициент проскальзывания движителя; L_1, L_2 - продольный и поперечный размер области контакта элемента движителя. Предполагается, что угол внутреннего трения материала полотна пути Φ_0 не подвержен анизотропии. При этом $\Phi_{\tau p}^{(1)}, \Phi_{\tau p}^{(2)}$ - анизотропные коэффициенты трения материала движителя о материал опорного основания;

$C_0^{(1)}$ - продольная связность материала поверхности движения.

Обобщенная функция сопротивления движению для всей машины определяется зависимостью, состоящей из $\Phi_{f_{\text{доп}}}$ - обобщенной функции сопротивления движению машины, несвязанной с взаимодействием движителя с материалом полотна пути, и Φ_{f_R} - обобщенной функции сопротивления движению, связанной с формированием вертикальной реакции полотна пути, которая зависит от процесса смятия материала дорожно-грунтового основания, экскавационно-бульдозерного и фрикционного вытеснения материала поверхности движения в межопорную область и проскальзывания элементов движителя, вызывающих потери энергии. Причем сопротивления от преодоления профильных препятствий учитываются в $\Phi_{f_{\text{доп}}}$. Формализуя процесс взаимодействия тягово-опорных систем транспортно-технологических машин с полотном пути, в данной главе показывается, что независимо от типов движителя и опорного основания обобщенная функция сопротивления движению Φ_{f_R} определяется математическим соотношением, которое имеет вид

$$\Phi_{f_R} = (1/2) N^{-1} \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^N \left\{ [L_{nm}^{(F1)}]^2 + [L_{nm}^{(F2)}]^2 \right\}^{1/2} [r_{nm}^{(\kappa\lambda)}]^{-1} \left[G_{\kappa}^{-1} \int_{\Omega} \sigma_{x3}^{(n)} d\Omega \right]_{nm}. \text{ Здесь параметры } L_{nm}^{(Fj)},$$

($j=1,2$) - продольный и поперечный снос результирующей реакции полотна пути, $r_{nm}^{(\kappa\lambda)}$ - динамический радиус элемента движителя, $\sigma_{x3}^{(n)}$ - вертикальные контактные напряжения определяются как функции компонентов тензора кинетических напряжений (T)

В качестве критерия проходимости транспортно-технологической машины по снегу согласно исследованиям, выполненным в ОНИЛВМ профессором Л.В. Бархтановым, можно использовать запас силы тяги от глубины снежного покрова $\Delta P_{\Phi} = f(H_r)$, где условие проходимости - запас силы тяги ($\Delta P_{\Phi} > 0$), а показатель проходимости - преодолеваемая высота данного по физико-механическим свойствам снежного основания. В связи с чем в работе предложена система критериев проходимости в виде: *мощностной функции* (запас мощности) $\Delta W = G_A v_A (\Phi_{\Phi} - \Phi_f) = f_w(\lambda_{\kappa}, \lambda_s, \lambda_p)$ или *силовой функции* (запас тяги) $\Delta P = G_A (\Phi_{\Phi} - \Phi_f) = f_p(\lambda_{\kappa}, \lambda_s, \lambda_p)$. Критерий проходимости может иметь и безразмерную форму $\Delta \Phi = (\Phi_{\Phi} - \Phi_f) = f_{\Phi}(\lambda_{\kappa}, \lambda_s, \lambda_p)$. Здесь λ_{κ} - параметры машины, включая и параметры движителя, λ_s - характеристики эксплуатационных условий, включая свойства и параметры полотна пути, λ_p - параметры, характеризующие режимы движения как кинематические, так и силовые. Причем эти параметры могут рассматриваться как по отдельности, так и в виде каких-либо комплексных характеристик. Значение любого параметра $\lambda_{\kappa, s, p}$ считается критическим, с точки зрения возможности движения машины, при которых функции $\Delta W = 0$, $\Delta P = 0$, $\Delta \Phi = 0$.

Для комплексной оценки транспортно-технологического средства по мобильности в системе "машина-местность" в работе предлагается *критерий концептуальной рациональности конструкционной конфигурации машины и оптимальной реализации режимов движения по проходимости в данных эксплуатационных условиях по природно-климатическим характеристикам местности* $\Delta P_{\Phi} = f(\lambda) \geq 0$, $\lambda \equiv \xi(\lambda_{\kappa}; \lambda_s; \lambda_p)$. В связи с чем имеют место следующие решения: 1) *концепция конструкции машины* ($\lambda_{\kappa} = \text{var}$, $\lambda_p = \text{const}$, $\lambda_s = \text{const}$) - для заданных условий эксплуатации и выбранных режимов управления движением определяется рациональная конструкционная конфигурация машины; 2) *концепция управления движением* ($\lambda_p = \text{var}$, $\lambda_{\kappa} = \text{const}$, $\lambda_s = \text{const}$) - для заданных условий эксплуатации и данной конструкционной конфигурации машины определяются оптимальные режимы управления движением; 3) *концепция условий эксплуатации* ($\lambda_s = \text{var}$, $\lambda_{\kappa} = \text{const}$, $\lambda_p = \text{const}$) - для данной конструкционной конфигурации машины и выбранных режимов управления

движением определяются критические характеристики условий эксплуатации.

Таким образом, предложенный и обоснованный в данной главе критерий возможности движения (проходимости) машины на основе обобщенных функций взаимодействия движителя с полотном пути, позволяет определять критические значения как конструктивных параметров машины и движителя, так и критические параметры состояния полотна пути, а также оценить предельные значения режимных характеристик (кинематических и нагрузочных).

На основе разработки формализованных моделей полотна пути (снежного покрова), движителя, и их совместного контактного взаимодействия созданы методики, алгоритмы и вычислительные программы расчета силы тяги, сопротивления движению, определения проходимости серийных машин и прогнозирования проходимости машин при проектировании новых и модернизации существующих образцов независимо от типа движителя и предполагаемой среды их эксплуатации.

ЧАСТЬ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ СО СНЕЖНЫМ ПОЛОТНОМ ПУТИ И ПРОХОДИМОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАШИН НА ЭТИХ ДВИЖИТЕЛЯХ ПО СНЕГУ

На основе разработанных во второй части диссертационной работы критериев в третьей части проводится комплексное экспериментально-теоретическое исследование взаимодействия движителей со снежным полотном пути и проходимости, специальных транспортно-технологических машин на этих движителях по снегу. В основном эти исследования направлены на изучение колесных машин, оснащенных эластичными шинами. Во-первых, это связано с тем, что 70% всего парка транспортно-технологических машин базируется на колесных шасси, как выпускаемых серийно, так и специально разрабатываемых. Во-вторых, коллективом сотрудников ОНИЛВМ при непосредственном участии автора данной работы в период с 1982 г. по 1992 г. проведено комплексное исследование влияния конструктивных характеристик колесного шасси на управляемость и проходимость колесных машин в различных природно-климатических эксплуатационных условиях. При этом для проведения данных исследований по заказу ВНИИТРАНСМАШ в ОНИЛВМ было разработано и построено специальное колесное шасси ГПИ-3901 с изменяемой в широких пределах конструкционной конфигурацией ходовой части машины и бортовым способом поворота, а также семейство средств повышения проходимости. Однако данный акцент на исследование колесных машин не уменьшает универсальных возможностей разработанной во второй части формализованной модели взаимодействия движителя с полотном пути, что и представлено во второй главе третьей части данной работы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ КОЛЕСНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ СО СНЕЖНЫМ ПОКРОВОМ ПОЛОТНА ПУТИ И ПРОХОДИМОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН ПО СНЕГУ. В данной главе приведены результаты экспериментально-теоретических исследований взаимодействия колес движителя со снегом и проходимости полноприводных колесных машин по снежному покрову. В ряде случаев для сравнения рассматривается движение машины по грунтовым средам (песку и луговине).

Выполнен анализ расчетных зависимостей для определения структурных параметров осадки колес движителя в материал полотна пути при образовании колеи. Проведено экспериментально-теоретическое исследование процесса образования колеи эластичным колесным движителем при взаимодействии его со снежным покровом водной природы с учетом экскавационно-бульдозерных эффектов и фрикционного течения материала опорного основания как в режиме прямолинейного, так и криволинейного движения. С ростом проскальзывания колес растут экскавационно-бульдозерные и фрикционные составляющие высот контакта, соответственно возрастает сопротивление движению, которое обуславливает увеличение проскальзывания.

Определена связь между показателем кинематического режима (радиус качения), относительным радиусом поворота, конструкцией шасси (4×4, 6×6, 8×8) и энергетическими затратами на движение на различных типах опорных поверхностей (снег, дерновая луговина, песок). Установлено, что максимальную долю до 50% затрат на передвижение, связано с работой первого колеса движителя, а экскавационно-бульдозерные эффекты и фрикционное течение снега, в целом по движителю, увеличивают затраты на передвижение на 30...40%.

Раскрыто влияние кинематического режима работы движителя на формирование опорных реак-

ций и деформацию шины. Определено изменение контактных напряжений по длине зоны взаимодействия со снегом в зависимости от скорости проскальзывания элементов поверхности шины. Показано формирование реакций полотна пути на колесах движителя при криволинейном движении. Установлена зависимость обобщенного коэффициента проскальзывания от радиуса поворота при криволинейном движении на различных опорных поверхностях (снег, мерзлый грунт, дерновая луговина, песок).

Определено влияние физико-механических свойств водного снега и конструкционных параметров колесного шасси на проходимость специальных машин по снежному основанию. На рис.13,а представлены расчетные зависимости влияния физико-механических свойств снега на проходимость колесной машины, которые выполнены по предложенной во второй части работы модели взаимодействия движителя со снежным полотном пути. Исходные характеристики рассматриваемых снегов представлены в табл.1. Установлено, что с повышением жесткостных характеристик снега, при сохранении его влажности 10...15% и постоянстве конструкционной конфигурации машины, преодолеваемая ею глубина снежного покрова возрастает. Однако проведенные теоретические исследования влияния влажности снега на развиваемое тяговое усилие (рис.13,б) и формирование сопротивления движению (рис.13,в) показали, что для снега, как и для грунтов, существует некоторый оптимум влагонасыщенности, при котором указанные силовые факторы достигают максимума. В связи с чем существует область по влажности снега, при которой снега любой плотности наиболее благоприятны с точки зрения их проходимости колесной машиной. В результате исследований влияния влажности водного снега на проходимость колесных машин установлено, что изменение влажности снега неоднозначно сказывается на сопротивлении движению и тяговом усилии. При уменьшении влажности снега сцепные свойства снега снижаются, происходит изменение структуры строения снежного покрова, что приводит к снижению как тягового усилия, в среднем на 40...60%, так и сопротивления движению на 20...35%. С ростом влажности снега наблюдается термодинамический переход снега (кристаллов льда) в жидкое агрегатное состояние, что также приводит к снижению или к полной потере сцепных свойств материала опорной среды, которую при влажности больше 30% нельзя назвать снегом. В среднем снижение сцепных свойств составляет 20...60%, а сопротивления движению 40...60%. Таким образом, существует некоторый диапазон влажности 12...20%, при котором снег может рассматриваться как удовлетворительное полотно пути. При других влажностях движение колесных машин становится проблематичным, если глубина снежного покрова превышает диаметр колеса.

В результате проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований установлено, что при любом самом рациональном сочетании конструкционных параметров колесного движителя и автомобиля невозможно добиться проходимости колесных машин по снежной целине водной природы, глубина которой превышает 0,85...1,08 радиуса колеса, где нижняя граница справедлива для снегов с плотностью 0,15 г/см³, а верхняя – 0,3 г/см³. При этом сопротивление движению машины на снежном покрове водной природы распределяется следующим образом: сопротивление от смятия - 65%; экскавационно-бульдозерное сопротивление - 30%; сопротивление от фрикционного течения материала опорного основания - 1,5%; сопротивление от примерзания и прилипания - 1,5%; гистерезисные потери в шине - 0,5%; сопротивление воздушной среды (зависит от скорости движения) ≈ 0,3%; прочие сопротивления - 1,2%. Наихудшим по проходимости для снежного покрова водной природы является снег с плотностью 0,15...0,20 г/см³ и толщиной залегания больше половины диаметра колеса. При этом по влажности граница проходимости снежного покрова лежит в диапазоне от 5 до 25 %. Снега с другой влажностью оказывают отрицательное влияние на формирование запаса свободной тяги.

Проведенные, на основе разработанной математической модели движения машины по снежному покрову, исследования показали, что определяющую роль в вопросе проходимости колесных машин по снегу играют конструкционные параметры шасси автомобиля. К наиболее значимым из них относятся: число осей, межосевое расстояние, внутреннее давление воздуха в шинах, полный вес шасси и распределение его по осям колес; тип шины и ее конструкционные параметры (диаметр, ширина и высота профиля, параметры протектора); коэффициент рассогласования угловых скоростей по бортам машины (характеристика механизма поворота); мощность энергосиловой установки. По ряду этих величин были проведены экспериментально-теоретические исследования, которые позволили установить их влияние на проходимость колесных машин по снегу. При этом показано, что конструкционные параметры влияют неоднозначно на проходимость машины по снегу.

Из анализа экспериментальных и теоретических исследований установлено, что с увеличением

числа осей сцепление движителей со снегом возрастает в среднем на 25%. При этом сопротивление движению, в среднем, уменьшается на 10%. В результате этого с увеличением числа осей показатель проходимости возрастает ориентировочно на 50%. При обеспечении условия равенства давлений в зоне контакта движителя со снегом у различных автомобилей эксплуатационные показатели неодинаковы. При этом характер изменения этих показателей, в зависимости от числа осей неодинаков.

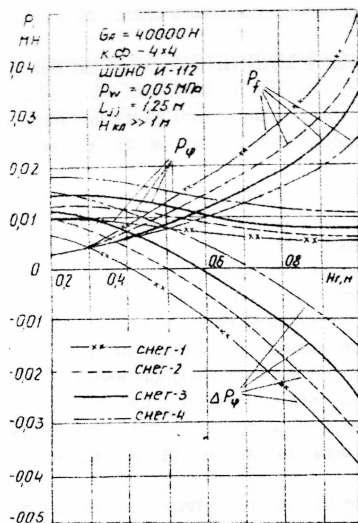
Из анализа результатов исследования влияния числа осей на поворотливость колесной машины при движении по снежной целине толщиной не более 0,3 м установлено, что: 1) с увеличением числа осей уменьшается буксование и, соответственно, потери скорости во время поворота, что особенно заметно при повороте с малыми радиусами; 2) рассогласование угловых скоростей колес отстающего и забегающего бортов при криволинейном движении машины с заданным радиусом уменьшается с увеличением числа осей; 3) с увеличением числа осей затраты мощности на поворот уменьшаются.

С уменьшением числа осей машины может измениться и расположение колес по базе автомобиля, то есть произойдет изменение межосевых расстояний L_{ij} . В большинстве случаев для машин повышенной проходимости межосевые расстояния при конструировании выбираются одинаковыми. Однако этот выбор чаще всего носит весьма субъективный характер и, в основном, определяется компактностью компоновки. При этом конструктор не учитывает того факта, что с ростом межосевого расстояния снижаются затраты на экскавационно-бульдозерное сопротивление. При достижении межосевым расстоянием величины порядка 3 м сопротивление стабилизируется и его падение становится несущественным, что позволяет в конструкционном плане ограничить рост межосевого расстояния тремя метрами и считать его дальнейшее увеличение нецелесообразным. Уменьшение межосевого расстояния для соседних колес должно производиться при комплексной оценке как компоновочных требований, так и требований к минимуму затрат на экскавационно-бульдозерное сопротивление.

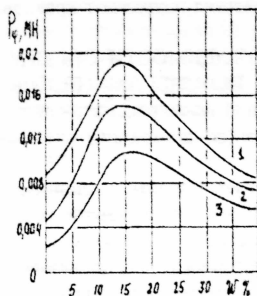
Одним из радикальных средств повышения проходимости колесных машин по снегу является снижение давления воздуха в шинах. Исследования показали, что, независимо от числа осей (колесной формулы), снижение давления воздуха в шинах с 0,25 до 0,05 МПа ведет к уменьшению силы сопротивления движению на 10...15%. При этом наблюдается увеличение тягового усилия на 10...20%. Определено, что с ростом давления воздуха в шинах проходимость колесных машин ухудшается, а с учетом экскавационно-бульдозерного сопротивления при давлении воздуха в шине 0,25 МПа может наступить потеря проходимости даже на снежной целине, глубина которой не превышает радиуса недеформированного колеса.

Тип шины и геометрические параметры колеса, в сочетании с другими характеристиками движителя, формируют определенный вариант (конструкционную конфигурацию) ходовой части машины, который в сочетании с определенными характеристиками полотна пути (снежного покрова), определяет возможность передвижения автомобилей по снежному опорному основанию. Анализ влияния конструкции колеса на проходимость автомобилей по снежной поверхности показал, что параметры протектора оказывают влияние не только на формирование тягового усилия, но и на экскавационно-бульдозерное сопротивление движению. Так, с ростом высоты грунтозацепа и уменьшением межосевого расстояния сопротивление движению от экскавационно-бульдозерных эффектов возрастает. В среднем, при увеличении высоты грунтозацепа с 0,02 до 0,04 м экскавационно-бульдозерное сопротивление возрастает на 40%, а общее сопротивление движению на 18...20%. При этом с увеличением высоты грунтозацепа тяговое усилие, развиваемое движителем, не имеет существенного прироста. Этот прирост, в среднем, не превышает 8,5%. Поэтому увеличение высоты грунтозацепа является малозффективным средством повышения проходимости колесных машин. Влияние шага грунтозацепов на экскавационно-бульдозерное сопротивление движению менее существенно, чем влияние высоты грунтозацепа. В среднем изменение силы сопротивления с ростом шага грунтозацепов и уменьшением межосевого расстояния, составляет 25%, а общее сопротивление движению машины увеличивается на 7...10%. При этом тяговое усилие с ростом шага грунтозацепов в пределах 0,1...0,3 м может быть увеличено на 30%. Однако с ростом шага грунтозацепов экскавационно-бульдозерное сопротивление стремится стабилизироваться, и его прирост становится менее существенен. Это объясняется тем, что уменьшается объем экскавируемого снега вследствие того, что расстояние между грунтозацепами возрастает, и при постоянном кинематическом режиме движения за одно и то же время через зону контакта проходит меньшее число грунтозацепов. Однако это не дает оснований для вывода, что увеличение шага грунтозацепов может привести к повышению проходимости. Как для получения оптимального тягового усилия, так и

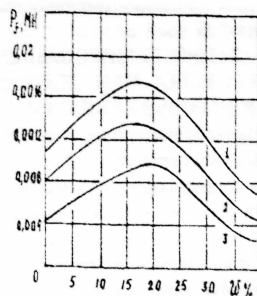
для получения наименьшего экскавационно-бульдозерного сопротивления шаг между грунтозащепами в каждом конкретном случае должен определяться путем оптимизации показателя проходимости.



а)



б)



в)

Рис. 13. Влияние физико-механических свойств снега на проходимость колесных машин: а) зависимость силы тяги, силы сопротивления и запаса силы тяги от высоты снежного покрова для различных типов снегов (табл.1); б) зависимость силы тяги от влажности снега при различной начальной плотности (1 - 0,35 г/см³, 2 - 0,25 г/см³, 3 - 0,15 г/см³); в) зависимость силы сопротивления движению от влажности снега при различной начальной плотности (значения начальной плотности см. для диаграмм на рис.14,б)

Таблица 1

Физико-механические свойства снега, использованные в теоретических исследованиях

Параметр	Снег-1	Снег-2	Снег-3	Снег-4
Исходная плотность, г/см ³	0,15	0,20	0,25	0,30
Исходная связность, Па	0,2·10 ³	0,5·10 ³	0,1·10 ⁴	0,1·10 ⁴
Исходный угол внутреннего трения (естественного откоса), рад	0,19	0,25	0,30	0,30
Исходный коэффициент жесткости, Н/м ³	0,2·10 ⁵	0,3·10 ⁵	0,5·10 ⁵	0,1·10 ⁶
Температура снежного покрова, °С	- 15			
Исходная глубина снежного покрова, м	1,0			
Влажность, %	12			
Вязкость, Па·с	1,5			

В целом, проведенные расчетно-теоретические и экспериментальные исследования показали, что самое оптимальное сочетание конструкционных параметров, с точки зрения возможности повышения проходимости с поворотливостью (управляемостью) при движении по снегу, не позволяет создать колесный движитель, который обеспечивал бы достаточную подвижность машины на снежной целине, глубина которой значительно превышала бы радиус колеса.

Сформулирована и решена задача применения средств повышения проходимости для колесных машин. Установлено, что двухскатный движитель малоэффективен на снегу. Установка широкопрофильных колес не дает ощутимых результатов по повышению проходимости для машин с полным весом менее 200000 Н. Плищевые цепи противоскольжения целесообразно использовать на снегах с глубиной снежного покрова менее 0,35 м. Дискретные уширители с семью элементами на колесо не эффективны, а с четырнадцатью элементами дают прирост проходимости на 20...25% по запасу силы тяги. Ленточный уширитель колес позволил повысить показатели проходимости на 32% по сравнению с

обычным колесным движителем. Резинометаллическая гусеница оказалась неэффективна из-за неустойчивости обвода на колеса при криволинейном движении. Звенчатая цельнометаллическая гусеница позволяет увеличить показатель проходимости на 40% по сравнению с обычным колесным движителем. Опорные площадки циклического действия позволяют кратковременно преодолевать снежный покров глубиной более 1 м.

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОХОДИМОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАШИН НА ЭЛАСТИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЯХ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО СНЕГАМ НЕВОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И СНЕЖНО-ГРУНТОВЫМ СМЕСЯМ. В данной главе рассматривается влияние химической природы снега и структурно-текстурных характеристик (концентрации) снежно-минеральных смесей на проходимость специальных машин.

Для деформируемого полотна пути (квазиоднослойный снег водной природы) была промоделирована возможность передвижения следующих вариантов конструкций специальных машин: колесного шасси 8x8; планетарно-колесного; колесного, оборудованного накидной гусеницей с обратной жесткостью; планетарно-каткового; шнеко-роторного. Исследования показали, что независимо от типа деформируемого опорного основания и его химической природы качественно-количественная картина их расположения по запасу свободной силы тяги не меняется и имеет следующий порядок наилучший вариант – полностью активный планетарно-колесный, планетарно-катковый, эластичный шнеко-роторный, колесный, оборудованный накидной пневмогусеницей, наихудший вариант – полноприводный колесный (рис. 14). Однако следует заметить, что с ростом глубины снежного покрова и, следовательно, снижением его структурной прочности преобладающими, с точки зрения проходимости, становятся машины, оснащенные сплошными движителями, то есть гусеничными, шнеко-роторными и планетарно-катковыми.

Для анализа влияния химической природы снега и концентрационного соотношения для снежно-минеральных смесей на проходимость специальных машин выбран наихудший вариант движителя – колесный 8x8 с давлением воздуха в шинах 0,25 МПа. Полагается, что другие варианты движителей будут иметь лучшую проходимость.

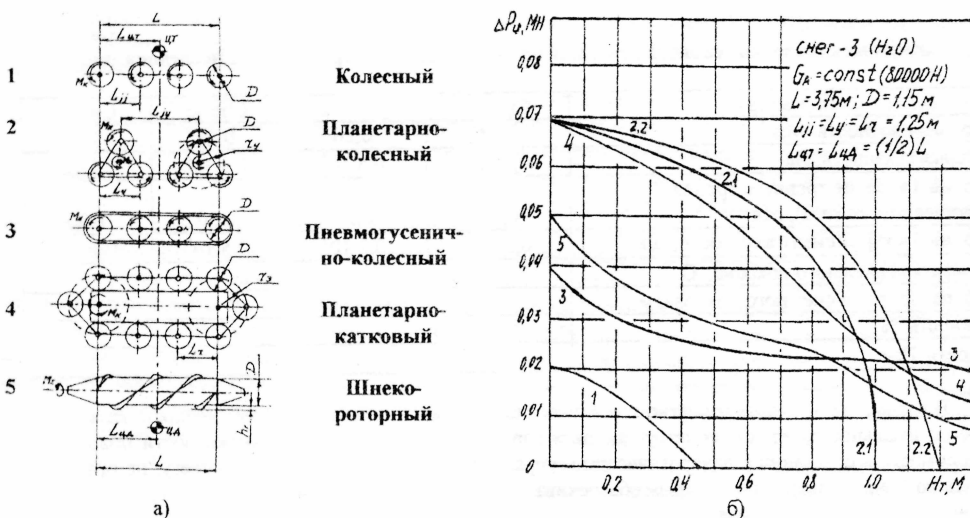


Рис. 14. Сравнительные характеристики проходимости машин на различных типах эластичных движителей по снегу: а) конструкционные параметры; б) запас силы тяги: 1 – колесный, 2 – планетарно-катковый; 2.1 – момент подведен только к звезде, 2.2 – момент подведен как к звезде, так и каждому колесу, 3 – колесный, оборудованный накидной пневмогусеницей, 4 – планетарно-катковый, 5 – эластичный шнеко-роторный; во всех конструкциях внутреннее давление воздуха 0,05 Мпа

Теоретическому исследованию (рис.15) подвергались следующие снега различной химической природы: аммиачный (NH_3), метановый (CH_4), углекислотный (CO) и двуокисьуглеродный (CO_2). Для сравнения на рис.15 представлены аналогичные зависимости для водного снега (кривая 1).

В качестве минерально-снежной смеси рассматривалась композиция, состоящая из снега водной природы и различной концентрации среднезернистого кварцевого песка (рис.16). Из проведенного анализа работы на снежных поверхностях неводной природы и опорных основаниях из минерально-ледовых смесей различных типов движителей (колесный, планетарно-колесный, колесный с накидной гусеницей, планетарно-катковый, роторно-винтовой) установлено, что 1) наилучшим по проходимости является водный снег, при этом по энергозатратам водный снег занимает среднее положение; 2) с ростом концентрации минеральной составляющей показатель проходимости (запас силы тяги от глубины снежного покрова) возрастает, при этом возрастают и энергозатраты на движение.

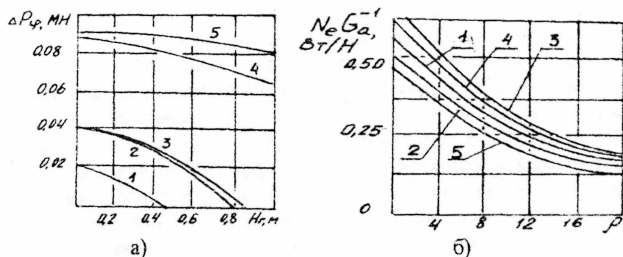


Рис. 15. Тягово-мощностные характеристики колесной машины при движении по снегам неводной природы: а) запас силы тяги от глубины снежного покрова; б) зависимость удельной мощности двигателя от удельного радиуса поворота; 1 - вода H_2O ; 2 - двуокись углерода CO_2 ; 3 - аммиак NH_3 ; 4 - метан CH_4 ; 5 - окись углерода CO

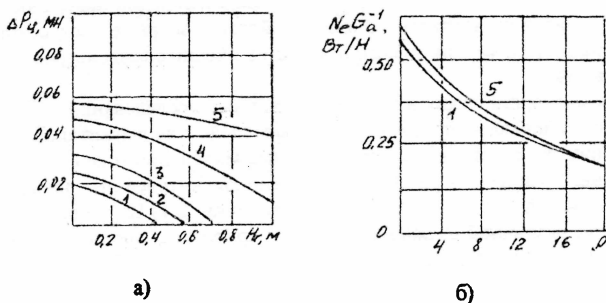


Рис.16. Тягово-мощностные характеристики колесной машины при движении по снежно-минеральным опорным основаниям на основе снега водной природы: а) запас силы тяги от глубины снежного покрова; б) зависимость удельной мощности двигателя от удельного радиуса поворота; 1 - 100% "снег-3"; 2 - "снег-3" + 10% минеральный грунт; 3 - "снег-3" + 50% минеральный грунт; 4 - "снег-3" + 90% минеральный грунт; 5 - 100% минеральный грунт (песок, удельный вес $1,6 \text{ г/см}^3$)

ПРИЛОЖЕНИЕ разделено на четыре части. В первом приложении приводятся справочно-информационные таблицы по всем трем частям диссертационной работы. Во втором приложении представлены краткие характеристики объектов исследований: полноразмерного ходового исследовательского макета колесного шасси с бортовым способом поворота ГПИ-3901 и средств повышения проходимости для его движителя; средств малой механизации лесного и фермерского хозяйств (минилесовоз ННПИ-1901, минитрелевщик НГТУ-1903), легкие многоцелевые плавающие транспортные машины (НГТУ-2901 колесная 8×8 с бортовым способом поворота, НГТУ-2401 гусеничная с асфальтоходными башмаками). В третьем приложении представлены акты внедрения результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе комплексного и системного подходов к изучению и анализу процессов, протекающих в системе “машина-двигатель-полотно пути-местность”, созданы основы научного направления, изучающего взаимодействие эластичных двигателей специальных транспортно-технологических машин при их движении по снежному покрову, которые включают следующие новые принципиальные положения: 1.1) концепцию поверхности движения как несплошной среды, учитывающую дисперсность структуры на основе концентрации несущей и дискретной фаз, вязкоупругопластичности на основе связи скоростей деформаций и напряжений, слоистости на основе отыскания передаточной функции деформации между слоями от функции внешнего воздействия; 1.2) концепцию эластичного движителя независимо от его типа и конструкционных особенностей, имеющего упругий отклик на внешнее воздействие, разработанную на основе представления топологии конструкции с использованием теории формализации системы многих тел; 1.3) концепцию процесса контактного взаимодействия движителя с полотном пути, рассматривающую его как нестационарный, анизотропный, пространственно-временной, с перемещаемой с проскальзыванием дискретной областью контакта, и вязкоупругопластичным откликом одного из контактирующих объектов на подвижное распределенное силовое воздействие другого упругого контактирующего объекта, которая учитывает распространение возмущений в опорном основании и их влияние на разупрочнение материала полотна пути; пространственное влияние фрикционного течения материала полотна пути и экскавационно-бульдозерных эффектов на формирование колес; 1.4) концепцию описания механического отклика на внешнее воздействие контактирующих объектов, разработанную на основе тензорных представлений о напряженно-деформированном состоянии фиктивного пространственно-временного (четырехмерного) материального континуума, и позволяющую не использовать аппроксимационные зависимости, описывающие сопротивление смятию и сдвигу, полученные на основе штамповых натурных испытаний; 1.5) обобщенные классификации поверхностей движения, опорно-тяговых двигателей и задач их контактного взаимодействия, впервые построенных на основе единых классификационных признаков механического отклика на внешнее воздействие и топологии строения рассматриваемого объекта.

2) В результате комплекса расчетно-теоретических и экспериментальных исследований на основе новых достижений в развитии научного направления, изучающего взаимодействие движителей с полотном пути, уточнена физическая картина, раскрыты единые принципы формирования колес, силы тяги и сопротивления движению для машин, оснащенных различными типами движителей при движении их по снегу, и получены следующие общие выводы, результаты и рекомендации: 2.1) Из проведенного анализа работы на снежных поверхностях различной физико-химической природы и опорных основаниях из минерально-ледовых смесей различных типов движителей (колесный, планетарно-колесный, колесный с накидной гусеницей, планетарно-катковый, роторно-винтовой) установлено, что независимо от химического типа снежного покрова или концентрации снежно-минеральной смеси наилучшим по проходимости является колесная машина, оснащенная полностью активным планетарно-колесным движителем, но с ростом глубины снежного покрова и, следовательно, снижением его структурной прочности преобладающими с точки зрения проходимости становятся машины, оснащенные сплошными движителями, то есть гусеничным, шнеко-роторным и планетарно-катковым. Также установлено, что наилучшим по проходимости по снегу является традиционный колесный движитель. 2.2) Независимо от конструкционной конфигурации движителя с ростом продольно-поперечного проскальзывания опорно-тягового механизма относительно полотна пути возрастает сопротивление движению в среднем на 30...40% из-за экскавационно-бульдозерных эффектов и фрикционного течения материала опорного основания. В результате этих эффектов глубина снежного покрова, который может преодолевать данная машина, уменьшается на 15...20%. 2.3) Влияние экскавационно-бульдозерных эффектов и фрикционного течения на проходимость машин существенным образом зависит от того, каким является движитель: монотипа или дискретный. Для монодвижителей (гусеница с обратной жесткостью и шнеко-роторный) дополнительное сопротивление от данных эффектов связано лишь с дополнительной экскавационной осадкой и поперечными выносными холмами, что приводит к снижению сопротивления движению по сравнению с дискретным движителем в среднем на 15%. 2.4) Для уменьшения отрицательного влияния экскавационно-бульдозерных эффектов целесообразно увеличивать межосевые или

межмодульные (межэлементные) расстояния в движителе и уменьшать высоту грунтозацепов. Однако при этом для улучшения маневренности машины целесообразно межмодульное расстояние уменьшать, а для увеличения тягового усилия увеличивать высоту грунтозацепа. В связи с чем конструкционные параметры – межэлементное (межосевое, межмодульное) расстояние и высота грунтозацепа должны подвергаться комплексной оптимизации при проектировании машин. 2.5) Независимо от типа и конструкционного решения движителя до 50% общего сопротивления движению машины создается передним лобовым участком монодвигателя (для гусеничного движителя – лобовым участком и первым катком) или первым элементом движителя дискретного типа. 2.6) При криволинейном движении машины независимо от типа и конструкции движителя, наряду с изменением вертикальных реакций, при изменении радиуса поворота растет проскальзывание и бинормальная реакция, которая также как и тангенциальная достигает своего максимума при 25-30% проскальзывании элемента движителя, после чего начинается их падение. 2.7) Сопротивление движению машины независимо от типа и конструкции движителя на снежном покрове водной природы распределяется следующим образом: сопротивление от смятия – 65% (где 45% – нарушение дисперсной упаковки, 30% – разрушение структурных неоднородностей: наста и ледяных прослоек); экскавационно-бульдозерное сопротивление – 30%; сопротивление от фрикционного течения материала опорного основания – 1,5%; прочие сопротивления – 3,5%. 2.8) Независимо от типа и конструкции движителя целесообразней повышать проходимость путем увеличения площади контакта за счет увеличения продольной линии контакта, а не ширины области движителя, соблюдая при этом рациональность отношения длины к ширине контакта как с точки зрения снижения удельных нагрузок на снежное полотно пути и уменьшения сопротивления повороту, так и из соображений, что показатель проходимости как функция длины и ширины области контакта имеет экстремум. 2.9) Независимо от конструкционной конфигурации машины и типа опорно-тягового механизма для ее стабильного движения по снежной целине целесообразно обеспечивать давление движителя на снег в диапазоне 0,008...0,02 МПа, где нижняя граница ограничена возможностью реализации стабильного тягового усилия, а верхняя – надежностью опорных свойств взаимодействующих объектов системы «машина-двигатель-полотно пути-местность».

3. Опираясь на теорию снежного покрова как полотна пути, разработанную в ОНИЛВМ, в данной диссертационной работе на основе предложенной обобщенной формализованной модели опорного основания вводится новая концепцию снежного покрова как полирельефной анизотропной дисперсной слоистой термодинамической среды, образованной из вещества единой химической природы, но находящегося в разных агрегатных состояниях, и имеющей вязкоупругопластичный отклик на внешнее воздействие изменяемый во времени. Точность модели экспериментальным данным составляет 20%, что для такой неустойчивой среды как снег вполне приемлемо.

4. На основе разработанной модели снега как опорного основания уточнена физическая картина поведения снежного покрова под действием внешних природно-климатических и техногенных факторов и установлено влияния свойств и характеристик снежного покрова на движение специальной транспортно-технологической техники, включая колесные машины. 4.1) Установлено, что с повышением жесткостных характеристик снега при сохранении его влажности в диапазоне 12...15% и постоянстве конструкционной конфигурации машины, преодолеваемая ею глубина снежного покрова возрастает пропорционально твердости снега. 4.2) Показано, что наилучший по проходимости для снежного покрова одной природы является снег с плотностью 0,15...0,20 г/см³ и толщиной залегания больше высоты дорожного просвета (для колесной машины больше половины диаметра колеса). 4.3) Впервые при рассмотрении уравнений связи параметров состояния снежного покрова, наряду с уравнениями учета влияния изменения плотности снега на его параметры, составлены уравнения фазовых переходов и, как следствие, предложены зависимости для учета влажности и температуры снега. В связи с чем установлено, что существует диапазон влажности 12...20%, при котором снег имеет явно выраженный экстремум по опорно-сцепным свойствам, при котором снег может рассматриваться как удовлетворительное полотно пути. При других влажностях движение колесных машин становится проблематичным, если глубина снежного покрова превышает дорожный просвет или половину диаметра колеса. 4.4) В результате проведенных исследований влияния влажности водного снега на проходимость колесных машин установлено, что изменение влажности снега неоднозначно сказывается на их сопротивлении движению и на реализуемом тяговом усилии. При уменьшении влажности снега его сцепные свойства снижаются, происходит изменение структуры строения снежного покрова, что приводит к уменьшению как тягово-

го усилия в среднем на 40...60%, так и сопротивления движения на 20...35%. С ростом влажности снега выше критического значения (20%) происходит резкое снижение несущих и сцепных свойств колесного движителя со снежным покровом и при его глубине более высоты половины диаметра колеса происходит потеря проходимости машины. В связи с чем единственным средством передвижения по таким снегам становятся машины на гусеничных, шнеко-роторных или комбинированных движителях, если глубина снежного покрова равна или незначительно, не более чем на 5...10%, превышает дорожный просвет. 4.5) Рассмотрены особенности структурных характеристик снежного покрова (наста и ледяных прослоек) и их влияние на деформируемость снежного массива. При этом установлено, что при движении транспортно-технологических машин независимо от типа движителя по снежному покрову с неоднородной по глубине структурой сложения (настовая корка и ледяные внутримассивные прослойки) энергозатраты на передвижение в зависимости от формирования снежного массива в среднем возрастают на 5...10%.

5. Поставлена и решена задача влияния химии снега на деформационные свойства снежного массива, и сделано прогнозирование проходимости транспортно-технологических средств на эластичных движителях при движении по снегам неводного происхождения. 5.1) Из проведенных исследований установлено, что химический состав снега существенно влияет на его деформационные свойства в особенности на сдвиговые характеристики, которые растут обратно пропорционально температуре кристаллизации снегообразующего вещества. Деформации смятия изменяются менее интенсивно, чем сдвиговые и зависят, в основном, от энергии химических связей материалов, образующих неводный снег. 5.2) Установлено, что из всех рассмотренных неводных снегов (метановый, аммиачный, двуокисьюглеродный, окисьюглеродный) наилучшим по проходимости является снег на основе двуокиси углерода. При этом у всех рассмотренных снегов неводной природы несущая способность лучше, чем у снега водного происхождения. Причем по мощностным затратам на единицу веса машины при равной глубине погружения движителя в снежный покров водный снег занимает среди рассмотренных снегов неводного происхождения среднее положение.

6. Поставлена и решена задача деформируемости минерально-ледовых сред, образованных механическим перемешиванием и сделано прогнозирование проходимости транспортно-технологических средств на эластичных движителях при движении по снежно-грунтовым смесям. Выявлен характер процессов, протекающих при пространственной деформации этих сред. Получены расчетные зависимости для определения сопротивления смятию и сдвигу материалов этих сред на основе введения в модель снежного покрова уравнений, учитывающих влияние концентрации компонентов минерально-ледовой смеси на изменение ее напряженно-деформированного состояния. При этом модель может быть распространена на минерально-ледовые смеси на основе неводных снегов и льдов. Установлено, что с ростом концентрации минеральной составляющей показатель проходимости (запас силы тяги от глубины снежного покрова) возрастает, при этом возрастают и энергозатраты на передвижение.

7. На основе разработанных положений формализации различных конструкций движителей как системы многих тел создана математическая модель колесного движителя, которая рассматривает движитель как дискретный опорно-тяговый механизм, состоящий из одинаковых по конструкции эластичных элементов (колес с шинами), и позволяющая учесть как конструкционные особенности колеса и шины, так и расположение колес по базе, а также передаваемые через каждое колесо кинематические и нагрузочные режимы.

8. Разработана математическая модель взаимодействия колесного движителя со снегом, включающая методику расчета обобщенных функций взаимодействия колесного движителя со снежным покровом.

9. Разработаны методики, алгоритмы и вычислительные программы расчета обобщенных функций взаимодействия колесного движителя с полотном пути, определения проходимости серийных машин и прогнозирования проходимости машин при проектировании новых и модернизации существующих образцов независимо от типа движителя и предполагаемой среды их эксплуатации.

10. На основе обобщенных функций взаимодействия движителя с полотном пути предложен и обоснован критерий возможности движения (проходимости) машины по зависимостям запаса силы тяги и запаса мощности как функции от параметров машины, включая и параметры движителя, либо как функции от характеристик эксплуатационных условий, включая свойства и параметры поверхности движения, либо как функции от параметров характеризующих режимы движения, либо как функции от

каких-либо обобщенных характеристик системы «машина-местность». Критерий позволяет определять критические значения как конструкционных параметров машины и движителя, так и критические параметры состояния полотна пути, а также оценить предельные значения режимных характеристик (кинематических и нагрузочных). Показано, что разработанная математическая модель взаимодействия колесной машины со снегом дает достоверную качественную и количественную оценку силы тяги и сопротивления движению

11. На основе обобщенной формализованной математической модели системы «местность-полотно пути-двигатель-машина» с использованием разработанных методик и программно-алгоритмического обеспечения, а также проведенного комплекса экспериментально-теоретических исследований выполнен сравнительный анализ проходимости по снегу и минерально-ледовым смесям специальных транспортно-технологических машин на различных движителях, в том числе и колесных машин с различными параметрами и типами колесных опорно-тяговых механизмов и при использовании на них различных средств повышения проходимости.

12. Результаты комплексного исследования, проведенного в рамках данной работы, позволили сформулировать ряд практических рекомендаций, которые можно использовать при проектировании специальных колесных машин. 12.1) Установлено, что при любом самом рациональном сочетании конструкционных параметров колесного движителя и автомобиля в целом с точки зрения повышения проходимости по снежной целине водной природы, глубина которой превышает $0,85...1,08$ радиуса колеса, где нижняя граница справедлива для снегов с плотностью $0,15 \text{ г/см}^3$, а верхняя - $0,3 \text{ г/см}^3$, в сочетании с поворотливостью машины, невозможно создать колесный движитель, который обеспечивал бы достаточную мобильность машины на снежной целине. В связи с чем поставлена и решена задача применения на колесных машинах средств повышения проходимости. 12.2) При решении задачи применения средств повышения проходимости для колесных машин установлено, что двухскатный движитель малоэффективен на снегу; установка широкопрофильных колес не дает ощутимых результатов по повышению проходимости для машин с полным весом менее 200000 Н ; применение колес с шинами сверхнизкого давления эффективно на машинах малой грузоподъемности полным весом не более 8000 Н ; плицевые цепи противоскольжения целесообразно использовать на снегах с глубиной снежного покрова менее $0,35 \text{ м}$; дискретные уширители с семью элементами на колесо неэффективны, а с четырнадцатью элементами дают прирост проходимости на $20...25\%$ по запасу силы тяги; ленточный уширитель колес позволил повысить показатели проходимости на 32% по сравнению с обычным колесным движителем; звенчатая цельнометаллическая гусеница позволяет увеличить показатель проходимости на 40% по сравнению с обычным колесным движителем; опорные площадки циклического действия позволяют кратковременно преодолевать снежный покров глубиной более 1 м . 12.3) С ростом числа осей возрастает экскавационно-бульдозерное сопротивление, и становится менее интенсивным рост тягового усилия из-за снижения нормальных давлений. При этом предельным значением межосевых расстояний, при которых экскавационно-бульдозерное сопротивление, связанное с межколесными холмами может считаться несущественным, составляет 3 м . 12.4) Уменьшение давления воздуха в шинах повышает тяговое усилие и снижает сопротивление за счет меньшей осадки колес в снег. При этом наилучший диапазон давлений колесного движителя на снег находится в диапазоне $0,008...0,02 \text{ МПа}$. 12.5) С увеличением диаметра колес проходимость автомобилей по снежной целине возрастает, так как сопротивление от смятия снега снижается. Это показывает, что целесообразно повышать проходимость колесных машин путем увеличения площади контакта за счет увеличения диаметра, а не ширины колеса, соблюдая при этом рациональность отношения диаметра к ширине с точки зрения снижения удельных нагрузок на полотно пути и уменьшения сопротивления повороту. Однако увеличение диаметра колеса при сохранении межосевых расстояний приводит к более интенсивному росту экскавационно-бульдозерных сопротивлений.

13 Реализация разработанных теоретических положений научного направления, изучающего взаимодействие эластичных движителей с деформируемыми опорными основаниями применительно к вопросу эксплуатации колесных машин на снежных поверхностях движения, позволила сделать следующее техническое заключение. 13.1) Определено, что конструкционные параметры влияют на проходимость колесных машин по снегу неоднозначно, а порой и противоречиво. Поэтому конструкционные параметры колесного движителя и машины в целом должны подвергаться комплексной оптимизации при проектировании. 13.2) На снегах с толщиной снежного массива до половины диаметра колеса

возможна эффективная эксплуатация колесных машин с традиционным по конструкционной конфигурации двигателем без применения специальных средств повышения проходимости. Однако при толщине снежного массива более половины диаметра колеса и протяженности заснеженного участка более $1/3$ базы машины движение автомобиля по снежной целине без применения специальных средств или наличия нетрадиционного колесного двигателя становится не возможным. 13.3) В связи с чем эксплуатацию колесных машин с традиционной конструкционной конфигурацией двигателя на целинных снежных поверхностях движения в целом можно считать не целесообразной.

14. Результаты экспериментально-теоретических исследований, методики расчетов, технические предложения, практические рекомендации повышения уровня проходимости внедрены при создании новых и совершенствовании существующих машин в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных (снегоходных) машин, в п/я А-7701, использованы при проведении НИОКР для АО Горьковский автомобильный завод (ГАЗ), Заволжского завода гусеничных тягачей (ЗЗГТ), Арзамасского машиностроительного завода, АО "Нижегородлес", Управления лесами по нижегородской области, АО "Нижегородлестоп" и Воскресенского райтопа, Муниципального предприятия "СПАС НН". Результаты работы используются в учебном процессе на кафедрах "Автомобили и тракторы" и "Строительные и дорожные машины" Нижегородского Государственного технического университета и кафедре «Автомобильной техники» Рязанского военного автомобильного института. Результаты работы вошли в научно-учебную коллективную монографию "Проходимость автомобилей" (1996 г.), и в методическую разработку "Формулы и алгоритмы для решения задач по теории автомобиля" (1990г.).

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

- 1 **Беляков В.В., Барахтанов Л.В., Кравец В.Н.** Проходимость автомобиля. - Н.Новгород: Изд-во НГТУ, 1996. - 200 с.
- 2 **Беляков В.В.** Методика расчета и анализа путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 - Нижний Новгород, 1991. - 307 с.
- 3 **Беляков В.В.** Исследование процесса взаимодействия эластичного колеса с деформируемым полотном пути с учетом экскавационных эффектов / Горьков. политехн. ин-т. - Горький, 1987. - 26с. - (Деп. в НИИИНАвтопроме 02.06.87, №1541-ап87).
- 4 **Беляков В.В.** Процесс образования колеи движителем машины с учетом экскавационно-бульдозерных эффектов / Горьков. политехн. ин-т. - Горький, 1989. - 54 с. - (Деп. в ЦНИИТЭИавтопроме 12.06.89, №1897-ап89).
- 5 **Беляков В.В., Козлов В.С.** Экскавационно-бульдозерное взаимодействие колесного движителя с полотном пути / Горьков. политехн. ин-т. - Горький, 1989. - 41 с. - (Деп. в ЦНИИТЭИстроймаше 19.03.90, №23-сд90).
- 6 **Беляков В.В., Козлов В.С., Курнев В.И.** Экспериментальные исследования проходимости и управляемости колесных машин // Повышение эффективности проектирования и испытаний автомобилей: Тез. док. региональной науч.-техн. конф. - Горький, 1986. - С.15.
- 7 **Беляков В.В., Курнев В.И., Козлов В.С.** Определение сопротивления движению многоосного полноприводного колесного движителя с учетом экскавационных эффектов // Седьмая науч. конф. Молодых ученых Волго-Вятского региона: Тез. док. - Горький, 1987. - С.68.
- 8 **Беляков В.В.** Расчет тягово-сцепных свойств полноприводных колесных машин при движении по снежной целине // Повышение эффективности проектирования и испытаний автомобилей: Тез. док. региональной науч.-техн. конф. - Горький, 1987. - С.10-11.
- 9 **Беляков В.В., Малыгин В.А.** К вопросу построения регрессионных уравнений связи параметров состояния снежного покрова // Повышение эффективности проектирования, испытаний, эксплуатации автомобилей и строительно-дорожных машин: Тез. док. региональной науч.-техн. конф. - Горький, 1988. - С.26.
- 10 **Беляков В.В.** Имитационное моделирование процесса взаимодействия колесного движителя с деформируемым полотном пути с учетом экскавационно-бульдозерных эффектов // Повышение надежности и экологических показателей автомобильных двигателей: Тез. док. всесоюзн. науч.-техн. конф. - Горький, 1990. - С.69.
- 11 **Беляков В.В., Барахтанов Л.В.** Влияние конструкционных параметров колесного шасси на проходимость автомобиля по снежной целине // Повышение надежности и экологических показателей автомобильных двигателей: Тез. док. всесоюзн. науч.-техн. конф. - Горький, 1990. - С.70.
- 12 **Беляков В.В., Козлов В.С., Курнев В.И.** Определение радиуса поворота многоосных машин с неповоротными колесами в идеальных условиях квазистатического поворота. - Горький, 1987. - 7 с. - (Деп. в ЦНИИТЭавтопроме 06.09.87, №1030-ап87).
- 13 **Беляков В.В., Барахтанов Л.В.** К вопросу выбора аппроксимационного уравнения для описания формы контактной линии взаимодействия колеса с полотном пути. - Горький, 1990. - 28 с. - (Деп. в ЦНИИТЭИстроймаше 12.12.90, №90-сд90).
- 14 **Беляков В.В., Барахтанов Л.В.** Влияние на эксплуатационные свойства автомобилей конструкционных параметров колесного шасси при движении по снежной целине // Повышение эффективности проектирования, испытаний и эксплуатации двигателей, автомобилей, вездеходных, специальных строительных и дорожных машин: Тез. док. и сообщ. Международ. науч.-техн. конф. - Нижний Новгород, 1994. - С.12.
- 15 **Беляков В.В.** Обоснование применения четырехмерных моделей взаимодействия колесного движителя с деформируемым полотном пути // Повышение эффективности проектирования, испытаний и эксплуатации двигателей, автомобилей, вездеходных, специальных строительных и дорожных машин: Тез. док. и сообщ. Международ. науч.-техн. конф. - Нижний Новгород, 1994. - С.14.

- 16 **Беляков В.В., Кудашов А.И., Виноградов К.Н.** К вопросу о свойствах фиктивной четырехмерной деформируемой Среды, применяемой для описания поведения реальных поверхностей движения // Повышение эффективности проектирования, испытаний, эксплуатации двигателей, автомобилей, вездеходных, специальных строительных и дорожных машин: Тез. док. и сообщ. Международ. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 1994. – С.15.
- 17 **Беляков В.В., Каленов С.П., Малыгин В.А.** К вопросу изменения плотности снега под нагрузкой // Повышение эффективности проектирования, испытаний, эксплуатации двигателей, автомобилей, вездеходов, специальных строительных и дорожных машин: Тез. док. и сообщ. международ. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 1994. – С.27.
- 18 **Беляков В.В., Панов В.И., Малыгин В.А.** Уравнения состояния снежного покрова в теории проходимости транспортных машин // Повышение эффективности проектирования, испытаний, эксплуатации двигателей, автомобилей, вездеходных и специальных строительных и дорожных машин: Тез. док. и сообщ. Международ. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 1994. – С.51.
- 19 **Беляков В.В., Малыгин В.А., Каленов С.П.** Экспериментально-теоретические исследования взаимосвязи параметров состояния снежного покрова // Повышение эффективности проектирования, испытаний, эксплуатации двигателей, автомобилей, вездеходов, специальных строительных и дорожных машин: Тез. док. и сообщ. Международ. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 1994. – С.42.
- 20 **Беляков В.В., Аникин А.А., Малыгин В.А.** Приложение теории распространения волн возмущений в пространственных средах к вопросу взаимодействия движителей колесных машин с полотном пути // Проектирование, испытание, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники. – Н.Новгород: НГТУ, 1997. – С.41-52.
- 21 **Беляков В.В.** Влияние химической природы снега на физические свойства снежного покрова как поверхности движения // Проектирование, испытание, эксплуатация и маркетинг автотранспортной техники. – Н.Новгород: НГТУ, 1997. – С.71-82.
- 22 **Беляков В.В., Безруков А.Л., Барахтанов Л.В.** Формализация конструкций движителей при моделировании движения транспортно-технологических машин // Проектирование, испытание, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники. – Н.Новгород: НГТУ, 1997. – С.82-95.
- 23 **Беляков В.В.** Три источника, три составные части теории взаимодействия движителей транспортно-технологических машин с полотном пути // Развитие транспортно-технологических систем в современных условиях: Материалы Международ. науч.-практич. конф. – Н.Новгород, 1997. – С.39-57.
- 24 **Беляков В.В., Кожевников А.Н.** К вопросу изучения влияния влажности снега на тягово-сцепные характеристики колесного движителя // Развитие транспортно-технологических систем в современных условиях: Материалы Международ. науч.-практич. конф. – Н.Новгород, 1997. – С.167-168.
- 25 **Беляков В.В., Лавров Д.А., Кожевников А.Н.** Снег как материал полотна пути, дисперсно-слоистой структуры и вязкоупругопластичного поведения под нагрузкой // Проектирование, испытание, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники. – Н.Новгород: НГТУ, 1997. – С.171-181.
- 26 **Беляков В.В., Лавров Д.А.** К вопросу изучения экскавационно-бульдозерного взаимодействия колесного движителя со снежным покровом в трехмерной постановке задачи // Развитие транспортно-технологических систем в современных условиях: Материалы Международ. науч.-практич. конф. – Н.Новгород: НГТУ, 1997. – С.201-203.
- 27 **Беляков В.В., Барахтанов Л.В., Кравец В.Н.** Исследование вопросов проходимости колесных машин // Механика машиностроения: Материалы международной науч.-техн. конф. – Набережные Челны, 1997. – С.45.
- 28 **Беляков В.В., Малыгин В.А.** Проходимость колесных машин по снегу // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-98: Материалы международной науч.-техн. конф. – Воронеж, 1998. – С.107.

Подписано в печать 26.06.99. Сдано в производство 02.08.99.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 2,0 Тираж 150 экз. Бесплатно

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия, 107005, Москва, 2-ая Бауманская, 5.
Множительный центр "КОТЕС", Россия, 603005, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 77