

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)**

На правах рукописи

УСИКОВ Виталий Юрьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОХОДИМОСТИ
АВТОМОБИЛЕЙ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ПУТЕМ ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ШИНАХ**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Келлер А.В.**

Челябинск 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ...	13
1.1 Анализ климатических и дорожных условий эксплуатации автомобилей многоцелевого назначения.....	13
1.2 Анализ влияния на проходимость автомобилей многоцелевого назначения конструктивных факторов	17
1.3 Анализ работ по вопросам повышения проходимости автомоби- лей многоцелевого назначения.....	23
1.4 Цели и задачи исследования.....	31
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО ДЕФОРМИРУЕМОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	34
2.1 Математическая модель движения автомобиля многоцелевого назначения	34
2.2 Экспериментальное определение параметров качения колеса.....	44
2.2.1 Лабораторные исследования на стенде «грунтовый канал».....	44
2.2.2 Частная методика проведения экспериментального исследования.....	49
2.2.3 Результаты лабораторного исследования.....	66
2.3 Выводы	67
3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	73
3.1 Цель, задачи и методика экспериментального исследования.....	73
3.2 Порядок и условия проведения экспериментального исследования.....	83
3.3 Оценка адекватности математической модели.....	86
3.4 Выводы	100

4 ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ПРОХОДИМОСТИ...	101
4.1 Обоснование децентрализации регулирования давления воздуха в шинах.....	101
4.2 Оценка эффективности предлагаемого способа повышения проходимости	115
4.3 Предложения по совершенствованию конструкции системы регулирования давления воздуха в шинах автомобиля многоцелевого назначения.....	119
4.4 Технико-экономическая оценка применения системы децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах	121
4.5 Выводы	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	133
ПРИЛОЖЕНИЯ	152

ВВЕДЕНИЕ

Автомобили являются самым массовым транспортным средством, широко используемым как в экономическом секторе страны, так и в структурных подразделениях федеральных государственных органов исполнительной власти, осуществляющих свою деятельность в интересах обороны и безопасности государства, обеспечения законности и правопорядка.

Значительную часть парка автомобильной техники составляют полноприводные автомобили различных модификаций – автомобили многоцелевого назначения (АМН). АМН различной грузоподъемности предназначены для эксплуатации по дорогам всех типов, а также и вне дорог при выполнении специфических задач, определяемых сферой деятельности государственных органов исполнительной власти и организаций экономического сектора страны. При этом базовые модели АМН предназначены для транспортировки грузов различного характера и перевозки к месту назначения людей. Модификации АМН используются под монтаж специальных средств, оборудования различного назначения и техники, используемых для выполнения своего функционального предназначения на стоянке и в процессе движения.

В то же время сфера применения автомобильной техники в силовых ведомствах непрерывно расширяется. Это объясняется рядом специфических свойств этого вида техники. Автомобильная техника менее связана транспортной инфраструктурой, чем другие виды транспорта, более мобильная и оперативная, позволяет осуществлять быстрое передвижение воинских формирований, перевозку грузов и военной техники по обходным дорогам и колонным путям.

Автомобильная техника позволяет осуществлять маневр материальными средствами при их подвозе к войскам, уменьшать количество погрузо-разгрузочных операций, обеспечивать подвоз грузов и личного состава, смонтированного вооружения и военной техники непосредственно к месту выполнения задач, менее уязвима от воздействия различных средств поражения, обладает вы-

сокой подвижностью.

Характерной особенностью эксплуатации АМН является их использование по дорогам всех типов, в условиях бездорожья, на местности с различной степенью пересеченности. АМН эксплуатируются по бездорожью и в условиях с развитой дорожной сетью, но в то же время качество дорожного покрытия в пределах нашего государства меняется в соответствии с природно-климатическими условиями и в зависимости от времени года.

Многофункциональный характер использования АМН предопределяет комплекс эксплуатационно-технических требований, предъявляемых к ним, которые отражают особенности вероятного и предполагаемого использования в различных природно-климатических условиях и общие конструктивные особенности, присущие автомобилям. Реализация этих требований в максимальной мере способствует удовлетворению потребностей в транспортных средствах такого типа со стороны потенциальных заказчиков.

АМН имеют достаточно высокий уровень подвижности и приспособленности к экстремальным условиям эксплуатации, используются в различных природно-климатических условиях – от крайнего севера до пустынь, участвуют в боевых действиях, вооруженных конфликтах, миротворческих миссиях, поисково-спасательных и разведывательных операциях экономического характера. Для выполнения поставленных задач они обладают высокими показателями проходимости, надежности, комфортабельности, безопасности движения, топливной экономичности и т.д.

Основной параметр, ограничивающий уровень подвижности АМН – опорная проходимость, определяющими факторами которой являются тяговые и скоростные возможности автомобилей.

При увеличении грузоподъемности автомобилей и при движении по деформируемым опорным поверхностям (ДОП) очевидны проблемы с уровнем опорной проходимости. Проходимость автомобилей всегда тем выше, чем меньше давление, оказываемое колесами на грунт, и чем меньше внутреннее давление воздуха в шинах. Следовательно, для повышения проходимости автомобиля при движе-

нии следует снижать давление воздуха в шинах, для чего используется штатная система регулирования давления воздуха в шинах (СРДВШ), которая повышает способность автомобиля к движению в зависимости от дорожных условий, типа грунта и природно-климатических условий.

Исключительность значения процесса регулирования давления воздуха в шинах АМН и его влияния на опорную проходимость признается многими авторами, в том числе Я.С. Агейкиным, П.В. Аксеновым, А.С. Антоновым, Д.А. Антоновым, В.Ф. Васильченковым, А.И. Гришкевичем, А.В. Келлером, А.С. Литвиновым, Ю.В. Пирковским, В.Ф. Платоновым, Г.А. Смирновым, Я.Е. Фаробиним, М.П. Чистовым, Е.А. Чудаковым, Н.Н. Яценко, M.G. Bekker, Z. Janosi, A.R. Reese, J.Y. Wong.

Проведенный анализ научных изысканий, патентно-лицензионной работы и результатов их внедрения в производство автомобильной техники показал, что зарубежными и отечественными производителями, научно-техническими школами принимаются активные меры по совершенствованию процесса регулирования давления воздуха в шинах и использованию его положительных качеств для повышения проходимости автомобилей, за счет автоматизации процесса и оперативной адаптации КД к дорожным условиям.

Учеными и инженерами научных школ МГТУ имени Н.Э. Баумана, МГТУ «МАМИ», ЮУрГУ (НИУ), НАТИ, НАМИ, 21 НИИИ МО РФ, Рязанского военного автомобильного института, ОАО «КАМАЗ», ОАО «АЗ УРАЛ» и др. создана хорошая теоретическая и экспериментальная научная база, но в то же время исследованию процесса качения по ДОП одиночного эластичного колеса и колесного движителя в целом в зависимости от нагрузки, приходящейся на колеса, последовательности качения колес в образуемой ими колее и установленного внутреннего давления воздуха в шинах уделялось недостаточно внимания.

Гипотеза исследования предполагает, что при движении автомобиля по ДОП имеется необходимость установления давления воздуха в шинах колесного движителя индивидуально для каждого колеса и в зависимости от физико-механических характеристик грунта опорной поверхности, нагрузки, приходя-

щейся на каждое колесо, номера (последовательности) прохода колес в образуемой ими колее.

Цель исследования. Повысить опорную проходимость АМН путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах.

Объект исследования. Система «АМН – внешняя среда».

Предмет исследования. Процесс движения АМН по ДОП с изменением давления воздуха в шинах и вертикальной нагрузки на колеса.

Задачи исследования:

– разработать математическую модель движения АМН по ДОП с учетом номера прохода колес по колее, нагрузки, приходящейся на них, и установленного давления воздуха в шинах;

– провести экспериментальное исследование качения колеса по ДОП с учетом децентрализованного регулирования давления воздуха в шине и варьирования нагрузки на него;

– обосновать способ повышения проходимости АМН путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах в функции от нагрузки, приходящейся на колеса, конструктивного их расположения в колесной формуле автомобиля и определить рациональные значения давления;

– провести экспериментальную оценку эффективности реализации предлагаемых решений.

Научная новизна работы:

– разработана математическая модель движения многоосных автомобилей по ДОП на базе моделей, разработанных учеными 21 НИИ МО РФ и МГТУ имени Н.Э. Баумана, которая позволяет учесть коэффициент сопротивления движению колес автомобиля функциональной зависимостью от внешних факторов: номера прохода колес по колее, нагрузок, приходящихся на них и установленного давления воздуха в шинах;

– получена функциональная зависимость коэффициента сопротивления движению колеса от внешних факторов (давления воздуха в шине, нагрузки, приходящейся на колесо, номера последовательного прохода колеса по грунтовому основанию ДОП) при движении по суглинистым грунтам различной влажности и

мокрому речному песку;

– обоснован способ повышения проходимости автомобилей многоцелевого назначения путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах в функции от нагрузки, приходящейся на колеса, и конструктивного их расположения в колесной формуле автомобиля.

Теоретическая и практическая значимость:

– разработанная математическая модель позволяет расчетным путем определить показатели характеристик прямолинейного движения многоосного автомобиля по деформируемой опорной поверхности с учетом функциональной зависимости коэффициента сопротивления движению колес автомобиля от нагрузки, приходящейся на колеса, их конструктивного расположения в колесной формуле автомобиля и установленного давления воздуха в шинах;

– определены диапазоны рациональных значений давления воздуха в шинах колес каждой оси многоосного автомобиля с колесной формулой 4x4, 6x6, 8x8, соответствующие наименьшим значениям коэффициента сопротивления движению, в зависимости от приходящейся на колеса нагрузки и их конструктивного расположения в колесной формуле автомобиля, при движении по характерным для условий эксплуатации АМН ДОП (суглинистый грунт различной влажности, свежевспаханный суглинистый грунт, мокрый речной песок);

– разработана автоматизированная СРДВШ АМН, позволяющая устанавливать давление воздуха в шинах колес каждой оси автомобиля в зависимости от приходящейся на них нагрузки.

Результаты проведенного исследования могут быть применимы в проектно-конструкторских и научно-исследовательских организациях, проводящих изыскания по модернизации находящихся в производстве и по разработке перспективных образцов АМН и их модификаций, используемых в различных сферах деятельности с учетом условий их эксплуатации.

Методология и методы исследования включают в себя математическое моделирование движения одиночного эластичного колеса по ДОП; теоретический анализ факторов, влияющих на проходимость автомобиля и эффективность его движения; экспериментальные исследования качения одиночного эластичного ко-

леса и движения АМН по деформируемому грунту. Выполнение исследования базировалось на основных положениях прикладной теории качения колеса и движения автомобиля; теоретической механики; теории автоматического управления; теории решения изобретательских задач; методах инженерного эксперимента; теории вероятности; математического анализа и планирования эксперимента.

На защиту диссертации выносятся:

- разработанная математическая модель движения АМН по ДОП с учетом функциональной зависимости коэффициента сопротивления движению от номера прохода колес по колее, нагрузки, приходящейся на них, и установленного давления воздуха в шинах;
- способ повышения проходимости АМН путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах в функции от нагрузки, приходящейся на колеса и конструктивного их расположения в колесной формуле автомобиля;
- результаты экспериментальной оценки эффективности реализации предлагаемых решений.

Основные результаты работы изложены и обсуждены:

- на Всероссийской 65-й научно-технической конференции с международным участием «Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России» (Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия «СибАДИ», г. Омск, 2011 г.);
- на VIII Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омский государственный технический университет, г. Омск, 2012 г.);
- на VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования» (Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия «СибАДИ», г. Омск, 2012 г.);
- на 77-й международной научно-технической конференции ассоциации автомобильных инженеров России «Автомобиле- и тракторостроение в России:

Приоритеты развития и подготовка кадров» (Московский государственный технический университет «МАМИ», г. Москва, 2012 г.);

– на межрегиональной научно-практической конференции «Инновационные технологии, системы вооружения и военной техники, наука и образование» «Броня-2012» (Омский филиал Военной академии материально-технического обеспечения, г. Омск, 2012 г.);

– на 67-й научно-практической конференции с международным участием «Теория, методы проектирования машин и процессов в строительстве» (Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия «СибАДИ», г. Омск, 2013 г.);

– на межрегиональной научно-практической конференции «Оборонно-промышленный комплекс: проблемы и перспективы развития» «ВТТВ-2013» (Омский филиал Военной академии материально-технического обеспечения, г. Омск, 2013 г.);

– на VII межрегиональной научно-практической конференции «Инновационные технологии, системы вооружения и военной техники, наука и образование» «Броня-Омск-2014» (Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, 2014 г.);

– на IX Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омский государственный технический университет, г. Омск, 2014 г.);

– на VIII Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» в рамках года науки Россия – ЕС по направлению «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, 2014 г.);

– на IV Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса» (Кузбасский государственный технический университет путей сообщения, г. Новокузнецк, 2014 г.).

Реализация результатов работы.

Основные результаты работы реализованы:

- ОАО «КАМАЗ» и ОАО «Автомобильный завод «Урал»» при проектировании перспективного семейства полноприводных автомобилей;
- Главным автобронетанковым управлением Министерства обороны Российской Федерации при разработке общих тактико-технических требований к образцам автомобильной техники и технических заданий на их разработку, а также оценке технического уровня разработанных образцов АМН;
- Научно-исследовательским испытательным центром автомобильной и бронетанковой техники 3 Центрального научно-исследовательского института Минобороны России, при формировании тактико-технических требований, предъявляемых к перспективным образцам автомобильной техники и при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- в воинских частях Министерства обороны Российской Федерации при повседневной эксплуатации автомобильной техники в сложных дорожных условиях и условиях бездорожья с использованием рекомендаций по децентрализации регулирования давления воздуха в шинах;
- в учебном процессе кафедры Колесные, гусеничные машины и автомобили Автотракторного факультета Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета);
- в учебном процессе кафедр эксплуатации бронетанковой и автомобильной техники, вождения, боевых гусеничных, колесных машин и военных автомобилей Омского автобронетанкового инженерного института (филиала Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала-армии А.В. Хрулева).

Публикации. Основные положения работы опубликованы в 27 научных статьях и изданиях (в том числе 7 работ опубликовано в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях), по результатам работы получен патент Российской Федерации на полезную модель.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования

и науки Российской Федерации рамках проекта «Разработка научно-технических решений по управлению распределением мощности в трансмиссиях грузовых автомобилей для повышения их энергоэффективности и топливной экономичности» по соглашению № 14.574.21.0106 от 08.09.2014 г. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57414X0106.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (180 наименований), приложения, содержит 159 страниц, 47 рисунков, 16 таблиц.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ климатических и дорожных условий эксплуатации автомобилей многоцелевого назначения

Условия эксплуатации АМН отличаются широким разнообразием. К факторам, определяющим особенности эксплуатации АМН относятся природно-климатические и дорожно-грунтовые условия и их сезонные изменения, развитие дорожной сети и степень возможного ее разрушения, рельеф, растительный покров, наличие водных преград и др.

К особым природно-климатическим зонам относятся: горные, пустынные районы, районы Крайнего Севера, лесисто-болотистая местность, где наряду с климатическими факторами велико значение рельефа местности и дорожно-грунтовых условий.

Труднопроходимыми участками местности являются горные районы. Участки горной местности с возвышенностями до 1000 м являются наиболее освоенными, имеющими, как правило, достаточно развитую дорожную сеть. Участки горной местности с возвышенностями свыше 1000 м имеют крутые склоны, часто покрытые лесными массивами и кустарником, которые становятся труднопроходимыми вне дорожной сети для колесной техники, а местами и для гусеничных машин. Дорожная сеть, как следствие, проложена по участкам долинной местности, склонам и карнизам гор, ущельям и через дефиле [62].

Значительная крутизна скатов, характерная для высоких (свыше 2000 м) гор, в большинстве своем исключает передвижение АМН вне дорог. Перевалы лежат на высоте от 1000 до 3000 м, большую часть года они покрыты снегом и недоступны для движения [62].

В горных районах узкие, извилистые с закрытыми поворотами дороги характеризуются наличием чередующихся подъемов и спусков крутизной от

3 до 6 %, а иногда 15–20 %. Подъемы и спуски занимают на некоторых участках до 40 % протяженности маршрута, длина которых достигает до 20 км [62]. Проходимость по дорогам, проезжая часть которых покрыта каменистым грунтом, резко изменяется в зависимости от сезонности и нестабильных климатических условий. Для данной местности характерна большая неустойчивость гидрометеорологических и погодных условий, присущи значительные перепады температур воздуха на различных высотах в зависимости от времени года и суток и достигают до плюс (минус) 40 °С. Существенно затрудняют передвижение АМН в горных районах метеорологические явления (гололедица, туманы, частые снежные метели, заморозки и оттепели, обильные снегопады, заносы, снежные лавины) и естественные разрушения горных пород (обвалы, осыпи, камнепады, оползни, селевые потоки и др.).

Пустынные районы на Южных и некоторых Дальневосточных направлениях занимают значительные площади. На использование АМН в этой особой зоне большое влияние оказывают высокая температура и запыленность воздуха. Средние температуры теплого месяца в пустынях плюс 32 °С, максимальная дневная температура летом достигает плюс 55 °С и падает ночью до 10 °С. Зима неустойчивая, но холодная. Морозы достигают минус 36 °С. Снежный покров незначительный, снегопады кратковременные, частые ветры большой силы (скорость ветра до 30 м/с) вызывают песчаные и пылевые бури [23, 97].

В зоне Крайнего Севера на использование АМН оказывают влияние низкие температуры воздуха, обширные труднопроходимые районы тундровой, заболоченной, лесотундровой и каменисто-озерной местности. Эти районы характеризуются суровым климатом, продолжительной зимой, глубоким снежным покровом, частыми буранами и продолжительной полярной ночью. В октябре–ноябре образуется устойчивый снежный покров, достигающий высоты до 2 м и делающий некоторые районы непроходимыми для колесной техники [23, 62, 97].

В периоды весенней и дождевой распутицы ранее хорошо накатанные грунтовые дороги становятся непроходимыми для колесной техники, кроме того, дороги с облегченным покрытием и грунтовые дороги могут стать труднопроходи-

мыми и в результате интенсивного движения по ним автомобильного транспорта.

Сезонные изменения погодных условий оказывают значительное влияние на подвижность АМН (проходимость, маневренность, быстроходность), живучесть (стойкость к воздействию окружающей среды, защищенность водителя (экипажа, бригады), эргономику и обитаемость) и готовность к применению (надежность, приспособленность к техническому обслуживанию, ремонту и хранению).

Для эффективного применения АМН в различных климатических районах необходимо проведение конструктивных, эксплуатационных и организационных мероприятий, направленных на снижение влияния негативных факторов природно-климатического характера. Кроме того, каждый из этих негативных факторов создает специфические условия, в том числе и экстремальные, влияющие на использование АМН. АМН всех классов грузоподъемности должны обеспечивать выполнение возложенных на них задач в любых природно-климатических и дорожно-грунтовых условиях.

Среди наиболее важных факторов, определяющих степень напряженности работы АМН на опорной поверхности, можно выделить сопротивление движению, сцепление колесного движителя (КД) с опорной поверхностью, макропрофиль дороги и кривизну в плане.

Сопротивление движению характеризует энергетические затраты на движение и служит одним из основных показателей дорожных условий.

Важнейшей характеристикой дорожных условий является возможность реализации силы тяги, необходимой для движения АМН, которая характеризуется коэффициентом сцепления.

Специфические условия движения АМН определяют значительный пробег в условиях бездорожья. При движении по деформируемым грунтам происходит значительное изменение характеристик грунта при каждом проходе по колее. В зависимости от типа грунта происходит его уплотнение, например, в случае движения АМН по суглинистой пахоте, или разрушение при движении по влажной луговине. Параметры грунта могут оставаться практически неизменными в случае движения по сухому сыпучему песку. Все это приводит к различным зна-

чениям коэффициентов сопротивления качению и сцепления под ведущими колесами автомобиля. Причем, если коэффициент сцепления при последовательных проходах колес по грунту увеличивается на 15–20 %, то изменение коэффициента сопротивления качению более значительно и может достигать 100 % [64, 72, 134]. При этом на характер изменения параметров опорной поверхности существенное влияние оказывают и эксплуатационные факторы: распределение массы по осям АМН (определяемое параметрами монтируемого оборудования, массой и размещением перевозимого груза), давление воздуха в шинах, силы внешнего сопротивления движению автомобиля.

Анализ погодно-климатических условий показывает, что для условий эксплуатации типичным является движение АМН по покрытиям с различной степенью неравномерного распределения сопротивления качению и сцепления, что обуславливает потребность в применении мер, необходимых для обеспечения требуемой эффективности АМН за счет роста средних скоростей движения и снижения затрат энергии на движение.

В связи с этим возникает требование по созданию необходимой силы тяги в различных условиях эксплуатации АМН для обеспечения достаточного уровня подвижности, что может быть достигнуто применением конструктивных решений:

- полным использованием сцепной массы АМН (достигается выполнением всех мостов ведущими, блокировкой межосевых и межколесных дифференциалов);
- рациональным сочетанием мощности силовой установки (двигателя) и параметров трансмиссии, позволяющим совершать движение в любых дорожных условиях и при бездорожье с необходимыми скоростями;
- применением однорядного расположения колес, что обеспечивает снижение коэффициента сопротивления движению на грунтовых опорных поверхностях;
- применением СРДВШ, что способствует уменьшению коэффициента сопротивления качению с одновременным увеличением коэффициента сцепления.

1.2 Анализ влияния на проходимость автомобилей многоцелевого назначения конструктивных факторов

Эффективность конструкции АМН (конструктивная эффективность) рассматривается как способность автомобиля при выполнении заданного уровня безопасности в конкретизированных условиях эксплуатации и при определенном сочетании его технических характеристик обеспечить максимальную степень выполнения технических требований.

Подвижность – это один из основных показателей АМН, характеризующий способностью исправных и работоспособных машин к быстрому перемещению в различных дорожных и климатических условиях при выполнении задач. Она определяется проходимостью, маневренностью, массово-габаритными и тягово-скоростными свойствами, которые определяют технический уровень применяемой техники.

Для обеспечения требуемого уровня подвижности необходимо совершенствование конструкции АМН, что позволит разрешить ряд вопросов, связанных с повышением показателей эффективности АМН: средней скорости движения, топливной экономичности, управляемости, устойчивости, проходимости и т.д.

Немаловажное значение в определении эффективности использования АМН в различных сферах человеческой деятельности имеет их проходимость. При этом многими авторами [4–6, 11, 28, 79] уделяется значительное внимание изучению различных факторов, характеризующих автомобиль как транспортное средство, и влияющих на эксплуатационное свойство, определяющее способность и возможность его движения по дорогам, в ухудшенных дорожных условиях и вне дорог, преодолевать различные препятствия естественного и искусственного происхождения.

Ввиду того, что практически невозможно изменить свойства опорной поверхности, определяемые природно-климатическими факторами, именно особен-

ности конструкции и возможность максимального использования технических параметров определяют эффективность эксплуатации АМН.

К факторам, характеризующим автомобиль и определяющим параметры его проходимости, принято относить тягово-динамические, геометрические, конструктивные.

К тягово-динамическим относятся: вес автомобиля, удельная мощность автомобиля и автопоезда, удельная мощность двигателя, коэффициент сцепного веса.

Геометрические параметры, зависящие от компоновочной схемы и конструктивных особенностей транспортного средства, принято относить к геометрическим факторам, определяющим проходимость как эксплуатационное свойство автомобиля: дорожный просвет, радиусы проходимости, углы свеса, угол перекоса осей.

Конструктивные факторы, определяющие проходимость АМН, представлены на рисунке 1.1.

Неоднородность и нестабильность грунтовых условий не позволяют в полной мере экспериментально провести оценку конструктивных параметров АМН, определяющих его проходимость. В то же время, тщательные аналитические изыскания по количественной оценке параметров АМН, проведенные Я.С. Агейкиным [4–6] позволяют провести общую сравнительную оценку конструктивных параметров.

Я.С. Агейкиным [3–5] предлагается обобщенный сравнительный показатель параметров проходимости автомобиля:

$$P_{cp} = \zeta_1 p_{min} + \zeta_2 h_K + \zeta_3 k_H + \zeta_4 \Delta_{np} + \zeta_5 k_{cц} + \zeta_6 \lambda + \zeta_7 D_{max} + \zeta_8 N_{yд} + \zeta_9 r_0 + \zeta_{10} \alpha + \zeta_{11} \beta + \zeta_{12} r_{np}, \quad (1.1)$$

где: P_{cp} – обобщенный сравнительный параметр проходимости;

p_{min} – минимальное давление на грунт;

h_K – дорожный просвет;

k_H – коэффициент насыщенности протектора;

Δ_{np} – высота грунтозацепов;

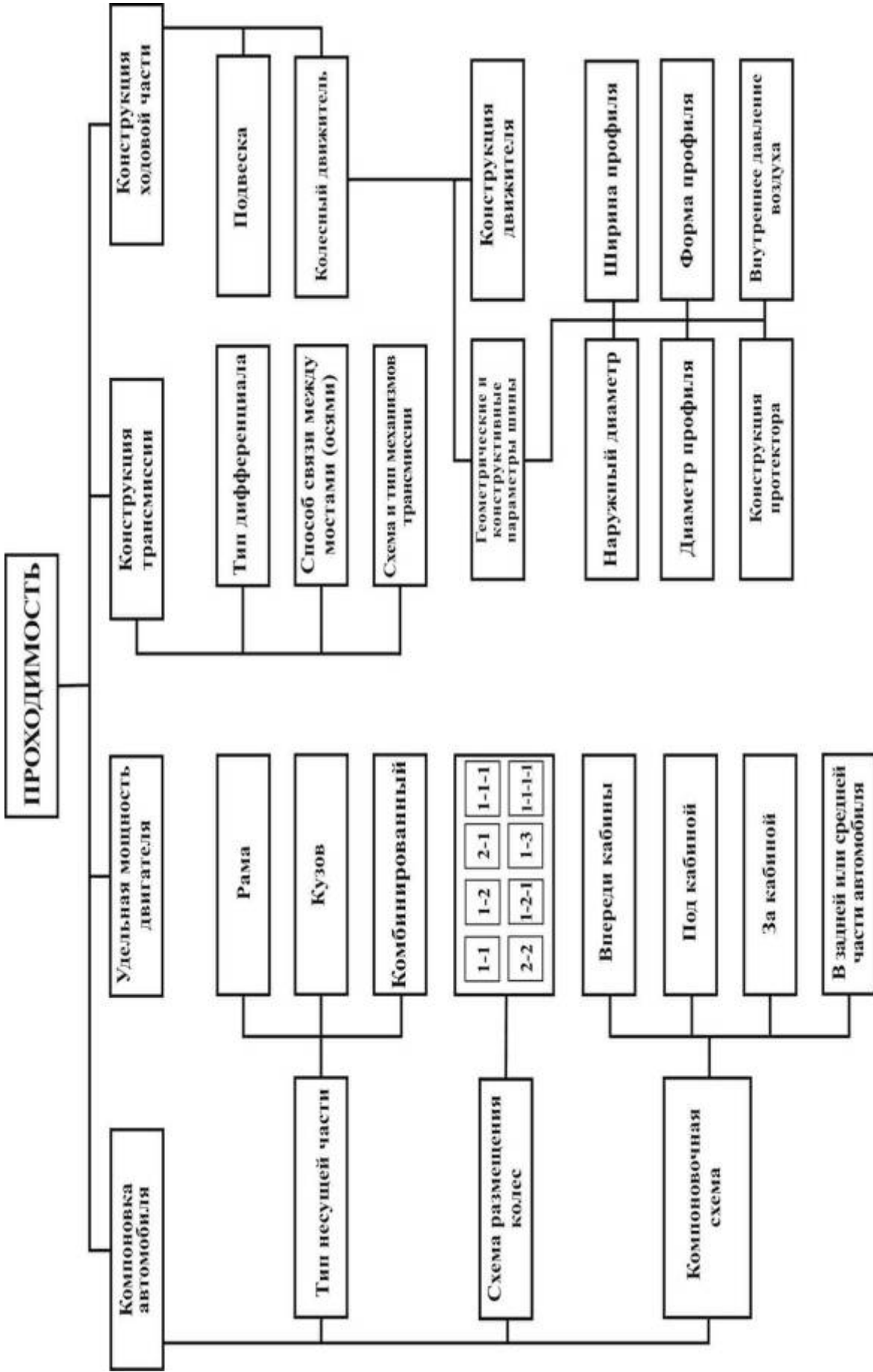


Рисунок 1.1 – Конструктивные факторы, влияющие на проходимость АМН.

k_{cu} – коэффициент сцепного веса;

λ – коэффициент блокировки части привода;

D_{max} – динамический фактор;

$N_{y\partial}$ – удельная мощность;

r_0 – радиус колеса;

α и β – углы свеса;

r_{np} – продольный радиус проходимости;

ζ_{1-12} – коэффициенты весомости каждого из параметров.

Исходя из данных, приведенных Я.С. Агейкиным [4–6], максимальные значения коэффициентов весомости присущи следующим конструктивным параметрам: минимальному давлению на грунт (0,12), дорожному просвету (0,15), коэффициенту сцепного веса (0,15) и динамическому фактору (0,1).

Компоновка автомобиля определяет геометрические факторы проходимости автомобиля, зависит от схемы размещения колес, типа несущей части и компоновочной схемы автомобиля. Эти конструктивные составляющие компоновки автомобиля обеспечивают способность преодолевать профильные препятствия, приспособленность к вытаскиванию и самовытаскиванию при застревании, маневренность машины, целесообразное распределение веса и его перераспределение в процессе движения, снижение расположения центра тяжести.

Максимальная скорость АМН определяется, главным образом, энерговооруженностью автомобиля – его удельной мощностью. Однако анализ показывает, что с увеличением удельной мощности АМН и массы монтируемого на нем специального оборудования темп роста скорости движения снижается, а достигнув определенного значения, скорость движения практически не повышается. Увеличение удельной мощности АМН не является универсальным и однозначным способом повышения его проходимости.

Схема и конструкция трансмиссии автомобиля определяет затраты мощности на плавность изменения подводимого к ведущим колесам момента, полноту использования сцепления КД с грунтом опорной поверхности и на буксование автомобиля.

Существенным конструктивным фактором, определяющим способность движения по бездорожью и степень проходимости АМН, является конструкция ходовой части автомобиля (подвеска и КД).

Характеристики подвески в значительной степени определяют степень изменения нормальных сил в контакте колес автомобиля с опорной поверхностью, что характеризуется изменением сил сцепления. Для устранения негативного воздействия подвески автомобиля на сцепление колес с опорной поверхностью необходимо максимальное увеличение ее хода и применение блокированной связи между колесами.

В то же время при движении АМН по ДОП от степени изменения нагрузки на колеса зависит характер деформации грунта опорной поверхности и величина сопротивления грунта качению. Особое значение это имеет при движении АМН по грунтам с низкой несущей способностью, на которых вследствие действия значительных динамических нагрузок может увеличиваться глубина образуемой колеи.

Значительное влияние из конструктивных параметров на определение проходимости АМН по ДОП оказывает конструкция КД. Условия применения транспортных средств в зависимости от типа и качественного состояния опорной поверхности исключительно многообразны, а повышение проходимости возможно за счет достижения предельного уровня проходимости конструктивными решениями. Одним из направлений является применение специализированных транспортных средств для определенных грунтовых условий. Для АМН главной составной частью КД является шина, которая в большей степени в соответствии с конструктивными и геометрическими параметрами и предопределяет его проходимость.

Характеристики процесса взаимодействия колеса с опорной поверхностью меняются в зависимости от качественного состояния грунтового основания, но при этом благодаря оптимальному соотношению геометрических параметров возможно значительное увеличение силы тяги.

Движение АМН по ДОП происходит с проскальзыванием колес по грунту,

что сопровождается сдвигом верхнего слоя в зоне контакта с частичным или полным разрушением грунта. При отсутствии уплотнения грунта опорной поверхности под колесами от воздействия вертикальной нагрузки происходит значительное снижение опорной реакции грунта, углубление колес в грунт и возникновение буксования, что характерно для шин, не имеющих достаточной площади контакта с опорной поверхностью, т.е. с номинальным давлением в шине.

В связи с этим при движении АМН по опорным поверхностям с низкой несущей способностью целесообразно производить понижение давления воздуха в шинах до оптимального для конкретного типа грунта, что способствует уменьшению сопротивления движению, повышению сцепных свойств колеса и конструктивно предусмотрено применением на АМН СРДВШ.

Наличие на автомобиле такой системы позволяет:

- во время преодоления труднопроходимых участков местности и при движении в сложных дорожных условиях повышать проходимость автомобиля, изменяя в ходе движения давление воздуха в шинах и доводя его до соответствия требованиям дорожных условий;

- совершать автомобилю движение до места стоянки без смены колеса при проколе шины (при этом утечка воздуха восполняется накачкой);

- производить контроль над давлением воздуха в шинах и своевременно доводить его до требуемой величины, увеличивая долговечность шин.

Таким образом, изменение давления воздуха в шинах повышает способность автомобиля к движению в зависимости от дорожных условий, дорожного покрытия, типа грунта, природно-климатических условий.

Исследованию движения автомобилей по пересеченной местности и выбору рациональных пределов изменения давления воздуха в шинах для движения по деформируемым грунтам были посвящены работы М.П. Чистова, В.Н. Абрамова, И.В. Веселова, А.А. Колтукова.

В ходе этих исследований было установлено существенное влияние характеристик шин на показатели опорной проходимости автомобилей. Однако вопросам исследований и получения характеристик шин с точки зрения их влияния, в

первую очередь, на показатели проходимости АМН до последнего времени уделялось недостаточное внимание. При этом не стоит забывать, что сами характеристики шин значительно зависят от давления воздуха в шинах. Тягово-скоростные свойства, управляемость автомобиля и опорная проходимость также изменяются в зависимости от давления воздуха в шинах и дорожных условий. Кроме того, изменение давления воздуха в шинах, как правило, продлевает срок службы и обеспечивает водителю автомобиля и грузу плавное, безопасное, с меньшими энергетическими затратами движение. Это допускает увеличение скорости на различных грунтах, зачастую, благодаря уменьшению давления в шинах, дает возможность произвести самовытаскивание при застревании. повышает топливную экономичность.

1.3 Анализ работ по вопросам повышения проходимости автомобилей многоцелевого назначения

Специфика условий эксплуатации АМН отражается на эксплуатационных свойствах техники и особо на способности осуществлять работу в процессе движения в различных дорожных условиях и по бездорожью, выполнять возложенные на нее задачи с максимальной эффективностью.

Автомобиль – это сложная механическая система, осуществляющая взаимодействие с внешней средой. Эффективность АМН определяется многими конструктивными параметрами (типом и видом компоновки, силовой установкой, конструкцией трансмиссии и ходовой части, в том числе, системы поддрессоривания и КД). Тяговое усилие при движении по опорной поверхности и в контакте с ней создает КД АМН. Поэтому выбор и определение его оптимальных конструктивных и эксплуатационных параметров можно определить как значимую задачу при проектировании АМН.

Значительное влияние (порой определяющее) на проходимость АМН оказывают количество и расположение по базе отдельных КД, возможность изменения нормальных нагрузок и крутящего момента, положение центра масс, изменение схемы поворота АМН в целом и отдельных КД.

Эксплуатационным параметром АМН, изменяемым в процессе движения, является давление воздуха в шинах. Количественное улучшение параметров опорной проходимости при изменении внутреннего давления воздуха зависит от типа грунта, размеров движителя и нормальных средних давлений, определяющих несущую способность грунтового основания.

Особая важность процесса регулирования давления воздуха в шинах АМН и его влияние на опорную проходимость признается многими учеными. Вместе с тем в теории автомобиля проходимость рассматривается как одно из технико-эксплуатационных свойств. Актуальной остается формирование единой законченной методики оценки проходимости колесных транспортных средств (КТС), а также алгоритмов выбора их основных конструктивных параметров. Проведению научных изысканий поиска решений существующих проблем посвящены работы многих ученых.

Изучению аспектов опорной проходимости КТС (в том числе АМН), а также связанным с ними вопросами теории качения одиночного КД по деформируемой опорной поверхности посвящено большое количество трудов отечественных и зарубежных ученых. Особый интерес представляют работы Я.С. Агейкина, А.С. Антонова, Д.А. Антонова, В.Ф. Бабкова, В.В. Белякова, А.И. Бируля, И.В. Балабина, Л.В. Барахтанова, С.В. Бахмутова, В.В. Белякова, Н.С. Вольской, Р.В. Вирабова, В.П. Горячкина, В.В. Гуськова, В.Н. Добромирова, Г.В. Зимелева, В.В. Кацыгина, А.В. Келлера, В.А. Комарова, Н.Ф. Кошарного, А.П. Куляшова, Г.М. Кутькова, В.В. Ларина, М.Н. Летошнева, В.Н. Наумова, В.А. Петрушова, Ю.В. Пирковского, В.Ф. Платонова, А.Ф. Полетаева, С.С. Саакяна, Г.А. Смирнова, Н.А. Ульянова, М.П. Чистова, И.В. Чичекина, Е.А. Чудакова, С.Б. Шухмана, M.G. Bekker, Z. Janosi, A.R. Reese, J.Y. Wong и многих других [1, 4–28, 30–37, 43–51, 53, 56–76, 78–104, 106–108, 110, 111, 131–180].

Математическое моделирование процесса взаимодействия деформируемого колеса с деформируемым грунтовым покрытием представляется структурной частью математической модели взаимодействия с деформируемой опорной поверхностью всего КД.

В настоящее время выработано несколько подходов к описанию процесса прямолинейного движения КТС с учетом очередности движения каждого КД в след предыдущему при изменении физико-механических характеристик грунта опорной поверхности после очередного прохода отдельного КД.

Учитывать характер изменений физико-механических характеристик грунта по результатам проходов одиночного деформируемого КД через варьирование удельного сопротивления грунта вдавливанию и степенного показателя, характеризующего закон изменения сопротивления грунта вдавливанию, предложено Н.Ф. Кошарным в работе [70].

Выработанные предложения по учету физико-механических характеристик грунта и их изменений при осуществлении последовательного прохода нескольких КД через изменение коэффициента сопротивления качению и предложенные математические зависимости при проведении пробных расчетов представлены в работе Ю.Л. Рождественского и В.Н. Наумова [103]. При этом разработанная авторами математическая модель движения АМН по деформируемому грунту может быть принята за основу с четом определения функциональной зависимости коэффициента сопротивления качению от давления воздуха в шинах, нагрузки, приходящейся на них и их расположения в колесной формуле.

Аспекты изменения физико-механических характеристик грунтового основания, происходящие как результат последовательного воздействия КД при движении по одной колее, используются в работах многих ученых для осуществления моделирования процесса движения многоколесного транспортного средства и взаимодействия всех КД с деформируемой опорной поверхностью, а также для определения показателей опорной проходимости.

Дальнейшее совершенствование методики расчетов процессов взаимодействия КД с деформируемыми опорными поверхностями, определение взаимосвязи

изменения параметров грунтов от последовательного воздействия нескольких одиночных КД транспортного средства и выработка методики расчета показателей опорной проходимости отражены в работе В.В. Сапожникова [105]. Однако предложенная модель не позволяет учитывать перераспределение нагрузки по осям при движении и наличие нагрузки на крюке при переходе от одиночного эластичного колеса к КД транспортного средства в целом.

Известны работы [31, 88, 89], в которых рассмотрено влияние конструктивных параметров на сопротивление движению КТС при движении по твердым опорным поверхностям. Некоторые ученые рассматривали влияние этих параметров на отдельные показатели проходимости КТС при движении по дорогам с деформируемым основанием, приняв за основу одну из математических моделей взаимодействия КД с грунтом.

Изучению влияния конструктивных параметров автомобиля (параметры ходовой части, число осей автомобиля, величина нагрузки на колесо, характеристики подвески, конструкция трансмиссии, коэффициент сопротивления качению и коэффициент тяги, давление воздуха в шинах) на глубину образуемой колеи уделено значительное внимание Я.С. Агейкиным [4–6]. В работах затронут довольно широкий спектр конструктивных и эксплуатационных факторов, параметров проходимости. Также Я.С. Агейкиным при проработке вопросов последовательного движения колесных движителей по одной колее предложено ведение учета временного фактора процесса воздействия КД на грунтовое основание.

Много работ, в том числе Р.В. Вирабова [30], посвящено исследованию влияния типа трансмиссии, положения центра масс, характеристик шин на сопротивление движению, но при этом в работе [30] другие параметры проходимости не рассматривались.

Г.А. Смирновым [108] отмечается, что деформация одиночного КД каждой последующей оси и сопротивление шин качению при неизменной нагрузке и давлении воздуха в шинах будет отличной от показателей колес предыдущей оси, при этом колеса второй и последующих осей совершают движение по опорной поверхности, деформированной предыдущими колесами. Работа, затрачиваемая

на деформацию грунта, и сопротивление грунта качению уменьшаются. В то же время при описании движения автомобиля Г.А. Смирновым [108] применялась модель качения жесткого (не деформируемого) колеса по ДОП, и это делает справедливыми выводы в указанной работе при исследованиях и расчетах качения деформируемого КД с высоким давлением воздуха.

В работе В.В. Ларина [76] проведено моделирование процесса взаимодействия КД с ДОП и определено, что параметры этого взаимодействия зависят от ряда факторов: нормальной нагрузки, угловой скорости вращения и крутящего момента. Отмечается, что в общем случае параметры взаимодействия каждого КД изменяются при изменении режима движения КТС, и возможность изменения давления воздуха в шинах при движении по различным опорным поверхностям позволяет повысить эксплуатационные характеристики КТС.

В.В. Лариным [76] также сформулированы общие тенденции при снижении давления воздуха для КД с различными нормальными средними давлениями в пятне контакта, а именно:

- снижение затрат мощности и увеличение угла преодолеваемого подъема на средне и сильно деформируемых грунтах;
- уменьшение влияния давления воздуха в шинах при увеличении числа осей;
- снижение давления воздуха в шинах на слабо деформируемых грунтах относительно оптимального значения увеличивает затраты мощности, но позволяет увеличить угол преодолеваемого подъема.

Используя экспериментальные данные В.Ф. Платонова, материалы исследований коллектива ФГУП «21 НИИИ Министерства обороны Российской Федерации», богатые экспериментальные исследования и публикации М.П. Чистова, а также разработанную методику, В.В. Ларин [76] выявил, что количественное улучшение параметров опорной проходимости при изменении давления воздуха в шинах зависит от ряда факторов, а именно от типа грунта, размеров движителя и нормальных средних давлений, определяющих несущую способность грунтового основания.

В.В. Ларин отмечает, что основополагающими факторами, определяющими положительное влияние изменения давления воздуха в шинах на опорную проходимость КТС, являются конструкция КД и параметры самой опорной поверхности. В.В. Лариным разработана методика расчета параметров движения эластичного колесного движителя по деформируемой опорной поверхности при прямолинейном движении с учетом физико-механических характеристик грунта, толщины деформируемого слоя грунта, экскавации обвала грунта в колею, числа проходов по колее.

М.П. Чистовым, В.Н. Добромировым, А.В. Острцовым, А.Э. Лильбоком и В.А. Комаровым в работах [78, 89, 91, 92, 135 и др.] с помощью математической модели, созданной коллективом авторов ФГУП «21 НИИИ Министерства обороны Российской Федерации», был выполнен большой объем работы по расчетной оценке проходимости автомобилей. Позднее автором [68] математическая модель, позволяющая исследовать влияние конструктивных и эксплуатационных характеристик на параметры проходимости АМН, была доработана.

Исследования, проводимые И.В. Чичекиным [137], позволили получить аналитические и экспериментальные данные и установить особенности взаимодействия КД с ДОП, а также выявить влияние конструктивных параметров автомобиля, параметров грунта и характера движения автомобиля на показатели взаимодействия колес с грунтом. И.В. Чичекиным в работе [137] отмечается, что при увеличении давления воздуха в шинах глубина колеи после прохода двух колес увеличивается во всем диапазоне дорог с деформирующимся покрытием, и на всей протяженности маршрута движения автомобиля влияние давления воздуха в шинах на сопротивление качению неоднозначно, т.к. на различных участках маршрута оптимальное давление различно.

Н.С. Вольской в работе [33] также отмечается, что с изменением давления воздуха в шинах глубина колеи после прохода нескольких колес изменяется практически для всех дорог с ДОП, и при наибольших нагрузках сопротивление качению увеличивается. Автором [33] разработана методика оценки деформации грунта при суммарном действии нагрузок (нормальной, продольной и боковой),

учитывающая временной фактор их действия и цикличность нагружения. Предложена зависимость изменения плотности грунта от количества нагружений. Разработана методика оценки взаимодействия многоосного КД с ровной ДОП с использованием универсальной методики оценки взаимодействия КД с грунтом с учетом скорости движения КТС, инвариантности грунта под КД в зависимости от номера оси.

Большой интерес представляют исследования, проведенные В.В. Беляковым и А.П. Куляшовым [24] по изучению проходимости КТС по снегам различного происхождения и снежно-грунтовым смесям. Авторы [24] также делают выводы, что определяющую роль в вопросе проходимости колесных машин по снегу играют конструктивные 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 конструктивные параметры (диаметр, ширина и высота профиля, параметры протектора); мощность энергосилового устройства. По ряду этих величин были проведены экспериментально-теоретические исследования, которые позволили установить их влияние на проходимость колесных машин по снегу.

В.В. Беляковым и А.П. Куляшовым [24] отмечается, что одним из радикальных средств повышения проходимости колесных машин по снегу является снижение давления воздуха в шинах. Исследования, проведенные авторами [24], показали, что независимо от числа осей снижение давления воздуха в шинах ведет к уменьшению силы сопротивления движению, при этом наблюдается увеличение тягового усилия. Также делаются выводы, что с ростом давления воздуха в шинах проходимость колесных машин ухудшается, а с учетом экскавационно-бульдозерного сопротивления может наступить потеря проходимости на снежной целине, глубина которой не превышает радиуса недеформированного колеса.

Исследования, проведенные В.Н. Абрамовым, М.П. Чистовым, И.В. Веселовым, А.А. Колтуковым [1] по оценке и выбору пневматических шин регулируемого давления для армейских автомобилей, позволили разработать математическое описание процесса прямолинейного качения одиночного эластичного колеса по

ДОП с учетом жесткостных характеристик резин, механических параметров грунта, позволяющее расчетным путем определить оценочные показатели характеристик этого качения. На основе этой модели была разработана модель прямолинейного движения автомобиля с учетом условий качения следующих по одной колее друг за другом колес разных осей. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили авторам сделать ряд выводов [1]:

- при движении на всех типах и моделях шин давление воздуха в них оказывает существенное влияние на все показатели опорной проходимости;

- снижение давления при движении по ДОП с номинального до минимально-допустимого позволяет повысить тягово-сцепные показатели и скорости движения для автомобилей, снизить удельное сопротивление качению и глубину образуемой колеи;

- процесс регулирования давления воздуха в шинах остается важнейшим фактором повышения опорной проходимости колесных машин, позволяющим АМН уверенно маневрировать, буксировать прицепы и преодолевать подъемы на пересеченной местности.

Зарубежными учеными также проводились исследования проходимости КТС. Так Н. Hovland и J.K. Mitchell [154] провели эксперименты с колесом лунного транспортного средства и определили геометрию разрушения грунтового основания, а также распределение изменения объемного веса грунта.

G. Swanson [166] исследовал характеристики сдвоенных и расположенных тандемом колес на песке. D. Gee-Clough [146, 147] развивал методику M. Bekker с учетом кинематики поверхностного взаимодействия и провел эксперименты на песке с жесткими КД с различными геометрическими параметрами.

Проанализировав результаты научных изысканий и работы вышеназванных авторов по исследованию опорной проходимости АМН, а также методов оценки ее показателей, можно сделать ряд выводов:

1. Решение комплексной задачи, связанной с повышением опорной проходимости АМН, обуславливает необходимость совершенствования методики расчета показателей опорной проходимости. При этом математическое описание

должно основываться на теории качения одиночного колеса, теории автомобиля и основных законах механики грунтов.

2. Разработанные к сегодняшнему дню математические модели взаимодействия одиночного КД с ДОП не обладают завершенностью, необходимой точностью и достаточной универсальностью, позволяющей легко реализовать их при практическом моделировании процесса. И это требует проведения дальнейших исследований.

3. Всеми вышеназванными авторами признается значительность процесса регулирования давления воздуха в шинах, большинство из них уделяют этому фактору значительное внимание в своих исследованиях влияния конструктивных факторов на проходимость КТС. Авторами отмечается, что с изменением давления воздуха в шинах и каждым новым проходом КД по ДОП, физико-механические характеристики грунта и толщина деформируемого слоя грунта изменяются.

4. Несмотря на общепризнанное огромное значение изменения давления воздуха в шинах при движении в условиях бездорожья, очень мало внимания уделяется необходимости установления рационального давления воздуха в каждом КД в зависимости от типа ДОП, нагрузки, приходящейся на колеса, и условий взаимодействия деформируемого колеса с грунтом.

1.4 Цели и задачи исследования

Специфика использования АМН в различных сферах деятельности человека во многом определяется условиями эксплуатации, которые отличаются широким разнообразием. К факторам, определяющим особенности эксплуатации АМН, относятся природно-климатические и дорожно-грунтовые условия и их сезонные изменения, развитие дорожной сети и степень возможного ее разрушения, рельеф, растительный покров, наличие водных преград и др.

Для эффективного применения АМН необходимо проведение конструктивных, эксплуатационных и организационных мероприятий, направленных на снижение влияния негативных факторов природно-климатического характера.

Проходимость АМН, безусловно, является одним из основных эксплуатационных свойств, способствующих их широкому применению. Проходимость АМН обеспечивается комплексом конструктивных мероприятий, выполняемых на стадии их проектирования, а также оптимальным изменением ряда параметров в процессе эксплуатации.

Существенным конструктивным фактором, определяющим способность движения по бездорожью и степень проходимости АМН, является конструкция ходовой части автомобиля (подвеска и КД).

Проходимость автомобиля по деформируемому грунту зависит от ряда факторов: нагрузки на оси автомобиля, типа и размеров шин, рисунка протектора, совпадения колеи передних и задних колес. Однако она всегда тем выше, чем меньше давление, оказываемое колесами на грунт, и чем меньше внутреннее давление воздуха в шинах.

Одним из эффективных способов изменения параметров и характеристик КД для повышения опорной проходимости при движении АМН по ДОП является использование СРДВШ, конструктивно предусмотренной на большинстве АМН. Понижение давления воздуха в шинах до минимально допустимого для конкретных условий движения способствует уменьшению сопротивления движению, повышению сцепных свойств КД.

Таким образом, изменение давления воздуха в шинах повышает способность автомобиля к движению в зависимости от дорожных условий, дорожного покрытия, типа грунта, природно-климатических условий.

Конструктивно предусмотренные на большинстве АМН СРДВШ являются централизованными и предусматривают установку одинакового оптимального давления в шинах всех колес в зависимости от условий движения.

В то же время на АМН применяются одинарные колеса, следствием чего является одинаковая ширина колеи всех осей, и при совершении прямолинейного

движения каждый последующий КД оси движется вслед предыдущему. Следствием движения каждого предыдущего КД является деформация грунта опорной поверхности и изменение его физико-механических свойств, естественно, и изменение всех показателей взаимодействия КД с ДОП.

При последовательных проходах колес по образуемой колее с одинаковым давлением воздуха в шинах возникают нерациональные потери энергии на качение колес и не полностью используются тяговые возможности. Следовательно, применяемая СРДВШ не в полной мере позволяет использовать возможности движения АМН по грунтам с низкой несущей способностью, в связи с чем представляется необходимым применение децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах АМН, т.е. установление рационального давления воздуха в колесах каждой оси в зависимости от типа и состояния ДОП, по которой осуществляется движения, нагрузки, приходящейся на колеса и их расположения в колесной формуле.

Цель работы – повысить проходимость АМН путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах.

Для достижения цели определены задачи исследования:

- разработать математическую модель движения АМН по ДОП с учетом номера прохода колес по колее, нагрузки, приходящейся на них, и установленного давления воздуха в шинах;
- провести экспериментальное исследование качения колеса по ДОП с учетом децентрализованного регулирования давления воздуха в шине и варьирования нагрузки на него;
- обосновать способ повышения проходимости АМН путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах в функции от нагрузки, приходящейся на колеса, конструктивного их расположения в колесной формуле автомобиля и определить рациональные значения давления;
- провести экспериментальную оценку эффективности реализации предлагаемых решений.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО ДЕФОРМИРУЕМОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.1 Математическая модель движения автомобиля многоцелевого назначения

В основу математической модели прямолинейного движения АМН по ДОП и последующее определение характеристик этого движения (показателей опорной проходимости) положено моделирование движения автомобиля, предложенное авторами в работах [35, 66, 67, 82].

В математической модели движения автомобиля по ДОП приняты допущения:

- рассматривается прямолинейное движение АМН по ровному опорному основанию;
- условия движения левого и правого бортов одинаковые;
- следы колес всех мостов (осей) по бортам автомобиля полностью совпадают;
- характеристики грунтовой поверхности по бортам автомобиля одинаковы;
- связь колес с кузовом автомобиля в вертикальной плоскости жесткая (без учета упругих свойств подвески);
- учитывается продольная податливость направляющих элементов подвески;
- крутящий момент двигателя воздействует непосредственно на колесо, упругодемпфирующие свойства элементов трансмиссии не учитываются;
- деформация грунта задается не через его непосредственные физические характеристики, а как удельные потери энергии при качении колеса по ровному основанию;

– реакция двигателя на изменение положения органа топливоподачи без запаздывания;

– характеристика крутящего момента, развиваемого двигателем, принята в виде наклонной прямой, максимальное значение которой определяется долями изменения положения органа топливоподачи.

В рассматриваемом случае при равенстве нагрузок под колесами левого и правого бортов автомобилей вместо пространственной можно воспользоваться более простой плоской расчетной схемой, которая представлена на рисунке 2.1.

В соответствии с этой схемой при прямолинейном движении без учета косогора (плоская схема) и продольного уклона на автомобиль действуют со стороны опорной поверхности со смещением по оси OX нормальные (R_{zi}) и со смещением по оси OZ продольные (R_{xi}) реакции в контакте колес с грунтом, а с другой стороны (без учета наклона корпуса автомобиля к опорной поверхности) — проходящий через центр тяжести нормальный к опорной поверхности вес автомобиля (G_a) и действующие на высоте центра парусности и тягово-сцепного устройства соответственно силы лобового сопротивления воздуха (P_e) и тяги на крюке (P_{KP}). Кроме этого при контактировании корпуса автомобиля или балок его мостов с грунтом появляются продольные силы бульдозерного сопротивления грунта P_{mi} , которые можно считать приложенными на уровне осей мостов (колес).

При этом уравнение прямолинейного движения автомобиля имеет вид [35]:

$$m_a \dot{V}_{Xc} = 2 \sum_{i=1}^n P_{xi} - (m_a g [f \cos(a + \beta) + \sin(a + \beta)] + P_{KP} + P_e + \sum P_{mi}), \quad (2.1)$$

Динамика движения колес описывается уравнениями [65, 66]:

$$J_{k_i} \dot{\omega}_{k_i} = M_{k_i} - (1 - S_{\bar{\sigma}_i}) (f_{w_i} + \varphi_i) R_{z_i} r_{k_0}, \quad (2.2)$$

$$m_{k_i} \dot{V}_{X_{ki}} = \varphi_i R_{z_i} - P_{x_i} - m_{k_i} g \sin(a + \beta), \quad (2.3)$$

где $i = 1, \dots, n$;

i – номер колес текущего моста;

m_a – масса автомобиля;

m_{ki} – масса колеса;

J_{ki} – момент инерции колеса;

\dot{V}_{Xc} – продольное ускорение центра масс автомобиля;

$\dot{\omega}_{ki}$ – угловое ускорение i -го колеса;

\dot{V}_{Xki} – продольное ускорение центра масс i -го колеса;

g – ускорение свободного падения;

α – угол наклона опорной поверхности;

β – угол наклона автомобиля, связанный с деформацией опорной поверхности;

φ_i – коэффициент сцепления;

f_{wi} – коэффициент сопротивления движению.

Угол β определяется [82]:

$$\beta = \arcsin \frac{H_n - H_1}{L}, \quad (2.4)$$

где H_n – глубина колеи после прохода автомобиля;

H_1 – глубина колеи после первого прохода ведущих колес;

L – база автомобиля.

Приращение глубины колеи определяется [134]:

$$H_i = \left(\frac{2R_{zi}}{k_{HPwi} c_i B \sqrt{2r_k} \left(2 - \frac{13}{15} \mu + \frac{1}{5} \mu^2 \right)} \right)^{1/\mu+0.5}, \quad (2.5)$$

где μ – показатель степени, характеризующий закон изменения сопротивления грунта вдавливаю;

B – ширина профиля шины;

R_{zi} – вертикальная реакция i колеса;

k_{HPwi} – коэффициент, учитывающий влияние давления воздуха на деформацию грунта [134];

c_i – коэффициент пропорциональности (показатель, характеризующий начальное сопротивление грунта вдавливаю штампа), для переднего колеса $c_1=c_0$, для последующих – $c_i = c_{i-1} H_{i-1}^\mu$;

H_i – коэффициент уплотнения грунта, численно равный приращению глубины колеи.

Сила, действующая на корпус автомобиля со стороны колеса по оси X [35]:

$$P_{Xi} = (X_{Ki} - Q_{Ki})C_{подв} + (V_{XKi} - V_{XC})B_{подв}, \quad (2.6)$$

где $C_{подв}$ – коэффициент жесткости подвески в продольном направлении;

$B_{подв}$ – коэффициент демпфирования подвески в продольном направлении;

X_{ki} – расстояние от центра масс до оси колеса по оси X;

Q_{ki} – расстояние от центра масс до точки крепления подвески по оси X;

V_{XC} – скорость центра масс автомобиля.

При определении характеристик взаимодействия колесного движителя с деформируемой опорной поверхностью коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью, определяющий тягу в пятне контакта, соответствует рисунку 2.2 и определяется по зависимости [35]:

$$\varphi = \text{Sign}(S_\sigma) \cdot \varphi_{max} \cdot \left(1 - e^{\frac{-|S_\sigma|}{S_0}}\right), \quad (2.7)$$

где S_σ – коэффициент буксования колеса;

φ_{max} – максимальное значение коэффициента силы сцепления колеса с опорной поверхностью;

S_0 – константа.

Характер изменения коэффициента сопротивления при качении колеса по деформируемому основанию и коэффициента взаимодействия колеса с опорной поверхностью (2.7) при определении по принятым зависимостям (2.7) и (2.8) полностью согласуется с результатами экспериментальных исследований (отсутствие экстремума функции $\varphi(S_\sigma)$, при φ_{max} и $S_\sigma \rightarrow 1$, $f_w \rightarrow \infty$, начальные энергетические

потери определяются коэффициентом сопротивления движению при отсутствии буксования в свободном режиме качения и т.д.).

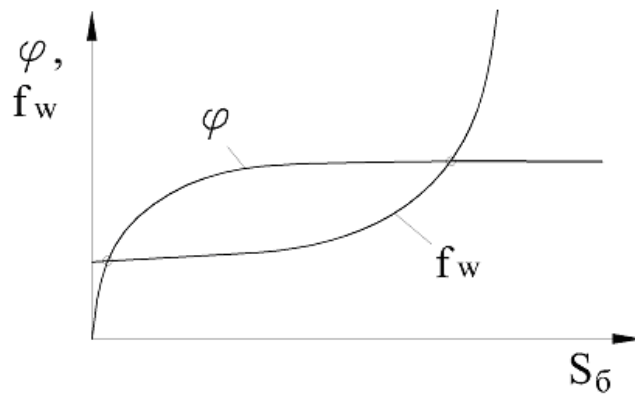


Рисунок 2.2 – Зависимости $\varphi(S_\delta)$ и $f_w(S_\delta)$

Сила сопротивления качению колеса [65, 66]:

$$P_{fwi} = f_{wi} \cdot R_{Zi}, \quad (2.8)$$

В связи с этим, зависимости (2.7) и (2.8) могут быть использованы при имитационном математическом моделировании в качестве характеристик деформируемого опорного основания наряду с использованием непосредственно экспериментальных характеристик.

где $f_{wi} = f_{w0i} - K_f \cdot \log\left(1 - \frac{\varphi_i}{\varphi_{i\max} \cdot (1 - e^{-\frac{-1}{S_0}})}\right)$ – коэффициент сопротивления ка-

чению колеса по деформируемому основанию (рисунок 2.3);

f_{w0i} – коэффициент сопротивления движению при отсутствии буксования в свободном режиме качения;

K_f – коэффициент пропорциональности [35].

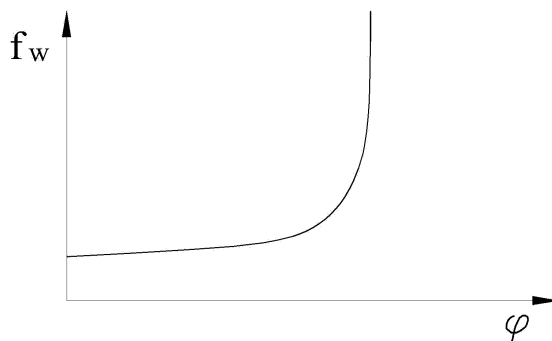


Рисунок 2.3 – Зависимость $f_w = f(\varphi)$

Из рисунка 2.3 видно, что движение возможно только с определенным ограниченным значением тяги. С ростом буксования тяга перестает увеличиваться, и вся энергия двигателя тратится на преодоление увеличивающейся силы сопротивления движению.

Коэффициент сопротивления качению является одной из важнейших характеристик и зависит от целого ряда конструктивных и эксплуатационных параметров. Их влияние так велико, что не позволяет использовать величину f в качестве постоянной технической характеристики. Как показывает анализ работ, проведенный в первой главе, особое влияние на изменение коэффициента сопротивления качению оказывают такие факторы как нагрузка на колесо, давление воздуха в шине и номер прохода колеса по ДОП. В связи с этим коэффициент сопротивления качению можно представить как функцию от этих параметров:

$$f_{w0i} = F(P_{wi}; R_{zi}; n_i), \quad (2.9)$$

где P_{wi} – давление воздуха в шине колеса, МПа;

R_{zi} – нагрузка на колесо, Н;

n_i – номер прохода колеса по колее (размещение колеса в колесной формуле АМН).

Функциональная зависимость коэффициента сопротивления была определена в ходе проведения лабораторного экспериментального исследования качения одиночного эластичного колеса по деформируемому грунту на стенде «грунтовый канал» и описывается уравнением:

$$f_{w0i} = (k_0 + k_1 P_{wi} + k_2 R_{zi} + k_3 n_i + k_4 P_{wi} R_{zi} + k_5 P_{wi} n_i + k_6 R_{zi} n_i + k_7 P_{wi} R_{zi} n_i)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.10)$$

где $k_0...k_7$ – коэффициенты коррекции коэффициента сопротивления качению.

Коэффициенты сопротивления качению f_{w0i} в ведомом режиме с номинальной нагрузкой и давлением воздуха в шине, а также значения коэффициентов коррекции коэффициента сопротивления качению k были определены при проведении лабораторных исследований на стенде типа «грунтовый канал» с различными типами опорных поверхностей при различных режимах нагружения.

Вертикальная реакция в пятне контакта колеса с опорной поверхностью определяется следующей зависимостью [35]:

$$R_{Zi} = P_{Zi} + m_{Ki} \cdot g \cdot \cos(\alpha + \beta). \quad (2.11)$$

Для двухосного АМН [81]:

$$R_{z1} + R_{z2} - \frac{G_a \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0, \quad (2.12)$$

$$G_a \cos(\alpha + \beta) X_{ki} - 2(M_{k1} + M_{k2}) + P_{KP} Z_{TCY} - 2R_{z2} L = 0. \quad (2.13)$$

Для трехосного АМН с задней балансирной тележкой [81]:

$$R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} - \frac{G_a \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0, \quad (2.14)$$

$$R_{z2} - R_{z3} = 0, \quad (2.15)$$

$$G_a \cos(\alpha + \beta) X_{ki} - 2(M_{k1} + M_{k2} + M_{k3}) + P_{KP} Z_{TCY} - 4R_{z2} \left(L - \frac{L_{3-4}}{2} \right) = 0. \quad (2.16)$$

Для четырехосного АМН с передней и задней балансирными тележками [81]:

$$R_{z1} - R_{z2} = 0, \quad (2.17)$$

$$R_{z3} - R_{z4} = 0, \quad (2.18)$$

$$2R_{z1} + 2R_{z2} - \frac{G_a \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0, \quad (2.19)$$

$$G_a \cos(\alpha + \beta) X_{ki} - 2(M_{k1} + M_{k2} + M_{k3} + M_{k4}) + P_{KP} Z_{TCY} - 2(R_{z2} L_{1-2} + R_{z3} L_{1-3} + R_{z4} L) = 0 \quad (2.20)$$

Упрощенная схема трансмиссии с дифференциальным приводом представлена на рисунке 2.4.

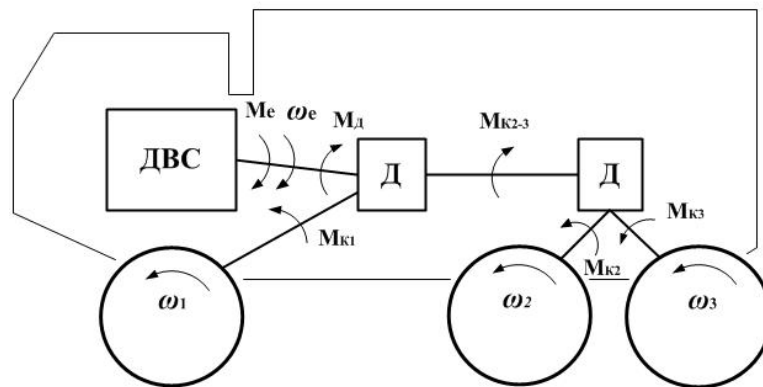


Рисунок. 2.4 – Схема трансмиссии с дифференциальным приводом

Для АМН с колесной формулой бхб динамика трансмиссии с дифференциальной связью будет описываться следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_e = \frac{\dot{\omega}_1 + 2\dot{\omega}_{2-3}}{3} \\ J_e \dot{\omega}_e = M_e - M_{\text{Д}} \\ J_1 \dot{\omega}_1 = \frac{M_{\text{Д}}}{3} - M_{k1} \\ J_{2-3} \dot{\omega}_2 = \frac{2M_{\text{Д}}}{3} - M_{k2-3} \end{array} \right. , \quad (2.21)$$

где J_i – момент инерции i -го колеса;

J_e – момент инерции двигателя;

$\dot{\omega}_a$ – угловое ускорение вращения вала двигателя;

M_e – момент, развиваемый двигателем на выходном валу коробки передач;

$M_{\text{Д}}$ – момент на корпусе дифференциала;

$\dot{\omega}_i$ – угловое ускорение i -го колеса;

$\dot{\omega}_{2-3}$ – угловое ускорение на задней тележке;

M_{ki} – момент сопротивления на i -ом колесе;

M_{k2-3} – момент сопротивления на задней тележке;

$M_{\text{б}}$ – момент блокировки.

$$\dot{\omega}_{2-3} = \frac{\dot{\omega}_2 - \dot{\omega}_3}{2}, \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{2} M_{k2-3} = M_{k2} = M_{k3}. \quad (2.23)$$

Упрощенная схема трансмиссии с заблокированной связью представлена на рисунке 2.5.

для дифференциальной и блокированной трансмиссии была реализована в виде блок-схемы и приведена в приложении А.

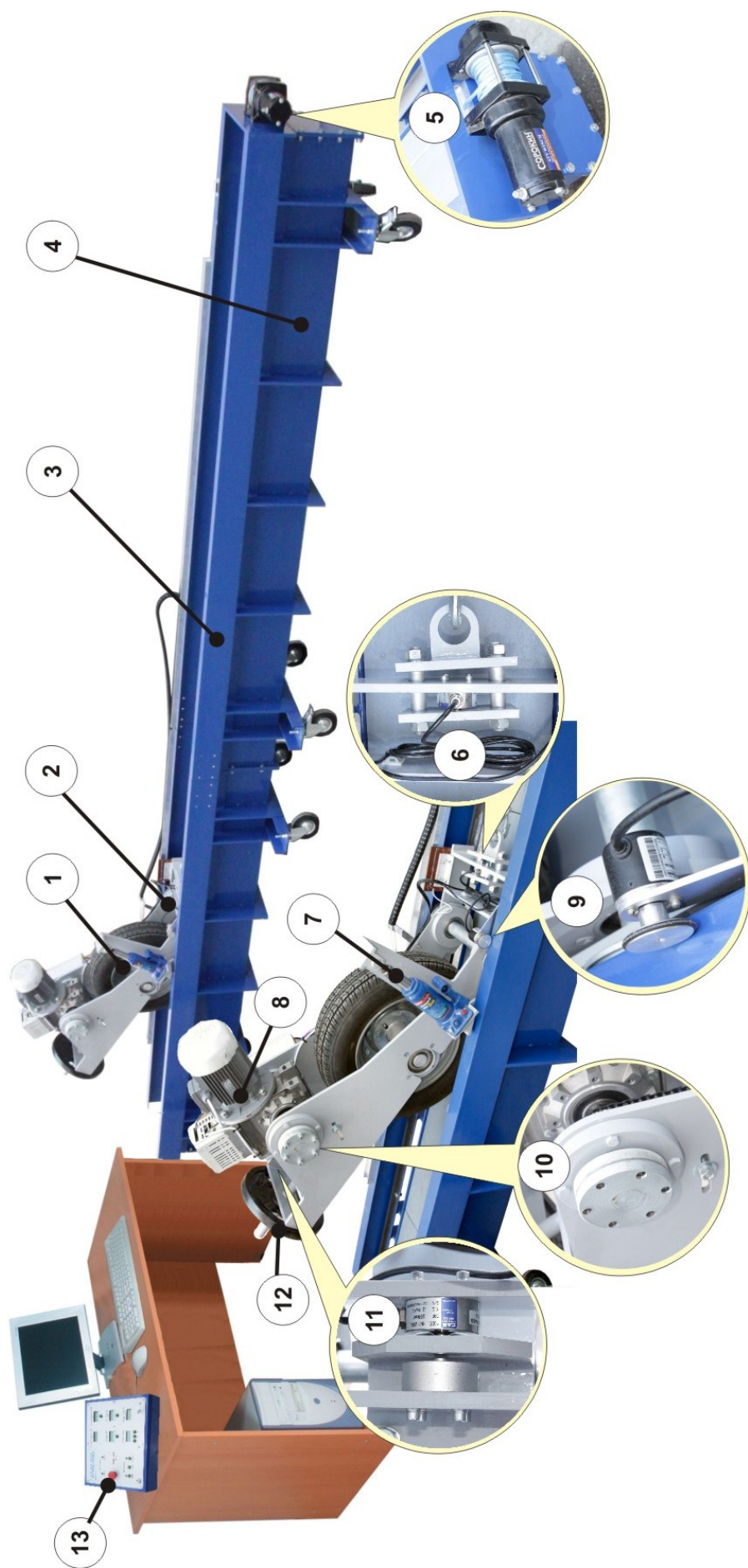
2.2 Экспериментальное определение параметров качения колеса

2.2.1 Лабораторные исследования на стенде «грунтовый канал»

Для проведения лабораторного исследования с целью определения коэффициента сопротивления качению колеса в свободном режиме с варьированием нагрузки на колесо и давления воздуха в шине, а также частных функций коррекции коэффициента сопротивления качению был создан стенд «Рабочие процессы колесного движителя». Стенд предназначен для проведения лабораторных исследований в диапазоне температур окружающего воздуха от плюс 10 до плюс 35 °С, относительной влажности воздуха до 80 % при 25 °С. Время подготовки стенда к работе после его включения – не более 5 мин.

Стенд обеспечивает проведение исследования рабочего процесса качения по грунтовому каналу одиночного эластичного КД с изменяемыми условиями качения в зависимости от нагружения колеса и изменения давления воздуха в шине. Лабораторный стенд, представленный на рисунке 2.6, состоит из:

- грунтового канала длиной 5000 мм, шириной 500 мм и глубиной 300 мм, заполняемого грунтом;
- силовой рамы, комплекта грузов;
- несущей тележки с направляющей;
- колеса с приводом;
- нагружающего устройства и подъемного устройств;
- датчиков силы, перемещения и момента, подводимого к колесу;
- электродвигателя с приводом и аппаратурой управления;
- отключающего фланца.



1 – колесо с приводом; 2 – несущая тележка с направляющей; 3 – силовая рама; 4 – грунтовый канал; 5 – нагружающее устройство; 6 – датчик силы; 7 – подъемное устройство; 8 – электродвигатель с приводом и аппаратурой управления; 9 – датчик перемещения; 10 – отключающий фланец; 11 – датчик момента; 12 – комплект грузов; 13 – панель управления

Рисунок 2.6 – Лабораторный стенд «Рабочие процессы колесного движителя».

Технические характеристики стенда представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики стенда.

№	Наименование параметра	Значение параметра
1	Номинальная мощность силового электродвигателя (не более), кВт	3,0
2	Диапазон рабочих частот вращения вала электродвигателя, мин ⁻¹	600 ... 3500
3	Электропитание стенда:	
	- напряжение питания стенда, В	380
	- род тока, частота, Гц	переменный, 50
	- потребляемая мощность системы управления, не более, кВт	0,8
4	Диапазон изменения давления воздуха в шине, МПа	0...0,5
5	Длина грунтового канала, мм	5000
6	Ширина грунтового канала, мм	500
7	Глубина грунтового канала, мм	300
8	Шина	ИБ 167–5.9R13
9	Нормальная нагрузка на колесо, Н	2500
10	Номинальное давление воздуха в шине, МПа	0,25
11	ЭВМ	диагональ экрана 19"; оперативная память 1024 Мб; жесткий диск 160 Гб; процессор Intel Celeron с тактовой частотой 1,8 ГГц; манипулятор типа «мышь»

Экспериментальные исследования проводились с использованием в грунтовом канале различных типов грунта с изменением их физико-механических характеристик:

- влажный речной песок («мокрый песок»);
- свежеспаханный суглинок («пашня»);
- суглинистый грунт влажностью 20 % («суглинок-20»);
- суглинистый грунт влажностью 35 % («суглинок-35»).

Привод управления колесом осуществлялся с панели управления стендом при различных режимах работы колеса с плавным регулированием усилия и изменением давления воздуха в шине в диапазоне от 0,05 до 0,25 МПа.

Изменение нагрузки на колесо производилось изменением количества грузов,

устанавливаемых на несущую тележку. Измерения усилия на колесо производились с точностью до 0,1 кН и его деформации с точностью до 1 мм.

При проведении экспериментальных исследований качение колеса осуществлялось в свободном режиме с изменением вертикальной нагрузки и давления воздуха в шине.

На модуле управления стендом (рисунок 2.7) в реальном времени регистрировались следующие параметры:

- частота вращения колеса;
- линейная скорость движения колеса;
- крутящий момент, подводимый к колесу;
- сила тяги колеса.

Электронная часть стенда представляет собой контроллер с прошивкой типа Automatic System KD 1.0.2. Информация с датчиков: усилия, положения колеса, частоты вращения и крутящих моментов — обрабатывалась управляемыми усилителями и после аналого-цифрового преобразования поступала в ЭВМ.



Рисунок 2.7 – Модуль управления стендом.

При запуске программы производился автоматический поиск USB-порта, к которому подключен лабораторный стенд. На странице программы отображались получаемые со стенда данные и графики исследуемой функции. Интерфейс программного обеспечения стенда представлен на рисунке 2.8.

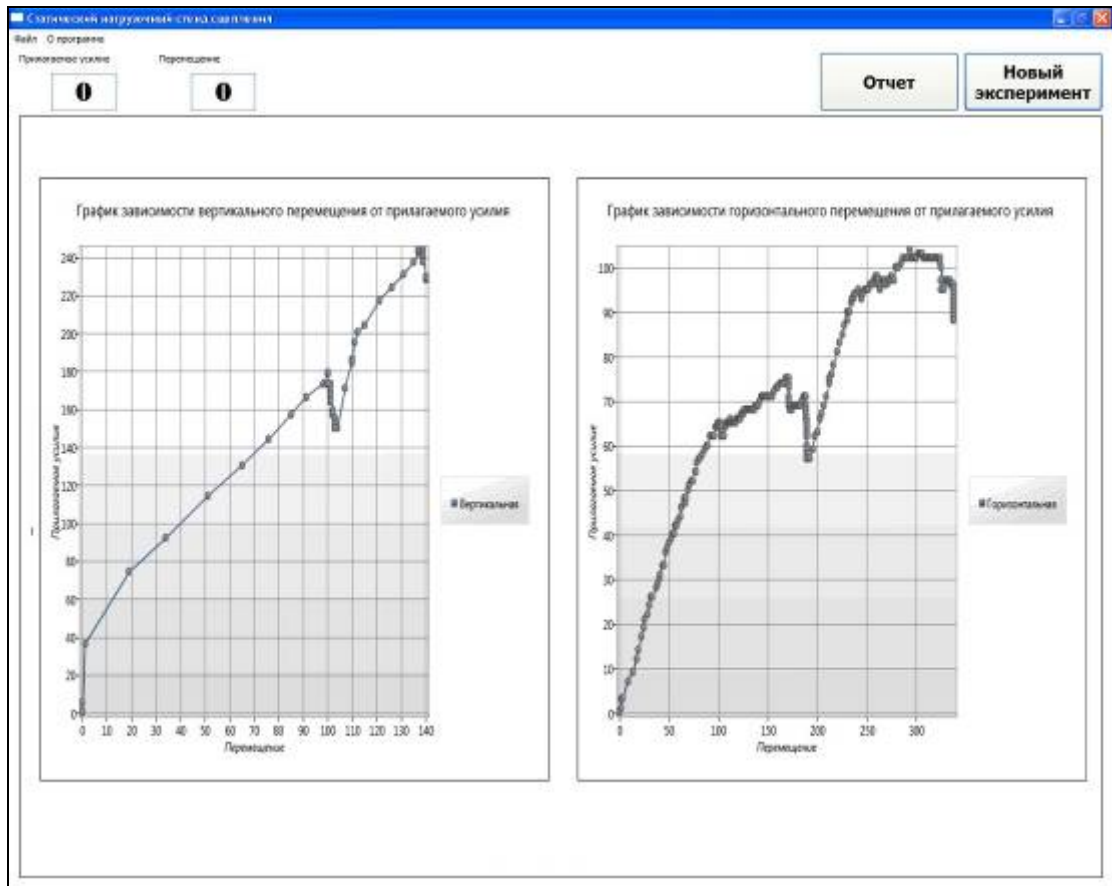


Рисунок 2.8 – Интерфейс программного обеспечения.

Для начала работы нажималась кнопка «Новый эксперимент». Выбирались из списка на правой стороне листа аргументы области определений (x) и область значений (y), затем нажималась кнопка «Начать запись данных».

На экране каждую секунду обновлялись данные, снимаемые с датчиков стенда. С использованием программного обеспечения производилось сохранение показателей и результатов проведенных испытаний КД на жесткий диск ЭВМ для последующей обработки. На монитор ЭВМ в режиме реального времени выводились следующие параметры и функциональные зависимости выбранных аргументов областей определений (x) и (y) в виде графиков:

- частоты вращения колеса;
- линейной скорости движения колеса;
- крутящего момента, подводимого к колесу;
- силы тяги колеса;
- вертикального усилия на колесо;
- вертикальной деформации шины;
- горизонтального усилия на колесо;
- горизонтальной деформации шины.

По завершении работы нажималась кнопка «Завершить запись данных». Результаты экспериментальной работы сохранялись в текстовом файле после нажатия кнопки «Отчет».

2.2.2 Частная методика проведения экспериментального исследования

1. В грунтовый канал засыпался необходимый для проведения исследования грунт.
2. Производилась подготовка грунта к проведению исследования (увлажнение, разрыхление, утрамбовывание, выравнивание по длине и ширине грунтового канала).

3. Устанавливалось заданное давление воздуха в шине.
4. Колесо устанавливалось до касания его грунта с использованием разгрузочного устройства и фиксировалось в указанном положении как нулевое состояние для замеров характеристик деформации грунта и шины.
5. С использованием грузов производилось нагружение колеса нормальной нагрузкой.
6. Нажатием кнопки «Установка нуля» на панели стенда производилась калибровка датчиков усилий и перемещения.
7. Выбиралась скорость движения колеса кнопкой на пульте управления.
8. Загружалось программное обеспечение, включалась измерительная аппаратура.
9. Включался привод к колесу.
10. Выполнялись три серии опытных экспериментов на подготовленном грунтовом основании с варьированием нагрузки на колесо и давления воздуха в шине.
11. В каждой серии опытов проводились три проката колеса по грунтовому каналу.
12. После каждого проката колеса по грунтовому каналу производилась его установка в исходное положение с фиксацией в нулевом состоянии для очередного замера характеристик деформации грунта и шины.
13. Очередной прокат колеса осуществлялся по колее в грунтовом основании, проложенной при предыдущем проходе.
14. После завершения серии опытов грунт в грунтовом канале приводился в первичное состояние с установлением заданных физико-механических характеристик.

Исходя из проведенного анализа методик планирования экспериментов [29, 42, 52, 77, 105, 109], для снижения погрешности измерений и максимально эффективной реализации сочетания уровней факторов было принято решение о планировании полного факторного эксперимента по типу 2^3 .

Оценка воздействия факторов производилась по величине линейных коэф-

фициентов, соответствовавших вкладу данного фактора.

На основе и по результатам априорной информации и предварительного исследования с учетом необходимости охвата всей описываемой области при решении задач интерполяции выбирались уровни варьирования факторов [109].

Уровни и интервалы варьирования представлены в таблице 2.2. Матрица полного факторного эксперимента полностью отвечала требованиям симметричности, нормированности и ортогональности. С использованием таблицы случайных величин проводилась рандомизация опытов [109]. Планы полного факторного эксперимента для грунта «пашня», «мокрый песок», «суглинок-20» и «суглинок-35» представлены в таблицах 2.3 – 2.6 соответственно.

Таблица 2.2 – Уровни и интервалы варьирования факторов.

Уровень фактора	Давление воздуха в шине колеса, P_w , МПа	Вертикальная нагрузка на колесо, R_z , Н	Номер прохода по грунтовому каналу
основной	0,15	2000	2
нижний	0,05	1000	1
верхний	0,25	3000	3
Интервал варьирования	0,1	1000	1

Таблица 2.3 – Полный план факторного эксперимента для грунта «пашня»

номер опыта	Факторы			Отклики				
	x_1	x_2	x_3	y^I	y^{II}	y^{III}	y_{cp}	y^2_{cp}
1	+	+	+	0,1321	0,1365	0,1361	0,1349	0,0182
2	-	+	+	0,0671	0,0632	0,0674	0,0659	0,0043
3	+	-	+	0,0552	0,0528	0,0513	0,0531	0,0028
4	-	-	+	0,0248	0,0271	0,0258	0,0259	0,0007
5	+	+	-	0,4551	0,4582	0,4580	0,4571	0,2089
6	-	+	-	0,2248	0,2231	0,2226	0,2235	0,0500
7	+	-	-	0,1792	0,1807	0,1801	0,1800	0,0324
8	-	-	-	0,0874	0,0891	0,0875	0,0880	0,0077

Таблица 2.4 – Полный план факторного эксперимента для грунта «мокрый песок»

номер опыта	Факторы			Отклики				
	x_1	x_2	x_3	y^I	y^{II}	y^{III}	y_{cp}	y^2_{cp}
1	+	+	+	0,1619	0,1627	0,1701	0,1649	0,0272
2	-	+	+	0,1213	0,1263	0,1253	0,1243	0,0155
3	+	-	+	0,0534	0,0599	0,0628	0,0587	0,0034
4	-	-	+	0,0427	0,0461	0,0441	0,0443	0,0020
5	+	+	-	0,5524	0,5592	0,5642	0,5586	0,3120
6	-	+	-	0,4176	0,4251	0,4206	0,4211	0,1773
7	+	-	-	0,1973	0,2017	0,1980	0,1990	0,0396
8	-	-	-	0,1486	0,1525	0,1489	0,1500	0,0225

Таблица 2.5 – Полный план факторного эксперимента для грунта «суглинок-20»

номер опыта	Факторы			Отклики				
	x_1	x_2	x_3	y^I	y^{II}	y^{III}	y_{cp}	y^2_{cp}
1	+	+	+	0,1021	0,1063	0,1078	0,1054	0,0111
2	-	+	+	0,0634	0,0686	0,0699	0,0673	0,0045
3	+	-	+	0,0543	0,0578	0,0568	0,0563	0,0032
4	-	-	+	0,0332	0,0384	0,0361	0,0359	0,0013
5	+	+	-	0,2245	0,2218	0,2221	0,2228	0,0496
6	-	+	-	0,1411	0,1437	0,1421	0,1423	0,0202
7	+	-	-	0,1176	0,1207	0,1187	0,1190	0,0142
8	-	-	-	0,0734	0,0782	0,0764	0,0760	0,0058

Таблица 2.6 – Полный план факторного эксперимента для грунта «суглинок-35»

номер опыта	Факторы			Отклики				
	x_1	x_2	x_3	y^I	y^{II}	y^{III}	y_{cp}	y^2_{cp}
1	+	+	+	0,1610	0,1647	0,1612	0,1623	0,0263
2	-	+	+	0,1574	0,1608	0,1615	0,1599	0,0256
3	+	-	+	0,0824	0,0879	0,0898	0,0867	0,0075
4	-	-	+	0,0871	0,0842	0,0849	0,0854	0,0073
5	+	+	-	0,2587	0,2633	0,2589	0,2603	0,0678
6	-	+	-	0,2547	0,2561	0,2587	0,2565	0,0658
7	+	-	-	0,1376	0,1389	0,1404	0,1390	0,0193
8	-	-	-	0,1355	0,1329	0,1426	0,1370	0,0188

Уравнение регрессии квадрата отклика для проведенного полного факторного эксперимента по каждому виду грунта определялось в виде [109]:

$$y^2_{\text{mod } i} = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + b_3 x_{i3} + b_4 x_{i1} x_{i2} + b_5 x_{i1} x_{i3} + b_6 x_{i2} x_{i3} + b_7 x_{i1} x_{i2} x_{i3}, \quad (2.27)$$

где x_{ij} – значение j -го фактора для i -ой точки спектра плана, число точек спектра плана равно 8 ($N = 8$), число переменных равно 7 ($d = 7$), число факторов равно 3 ($n = 3$), число повторных опытов равно 3 ($m = 3$).

Векторы-столбы матрицы F численных значений базисных функций $\vec{f}(\vec{x}) = (1, x_1, x_2, x_3, x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3, x_1 x_2 x_3)$ попарно ортогональны и матрица Фишера Φ для данного эксперимента равна:

$$\Phi = \begin{pmatrix} N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & N & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

Тогда оценки коэффициентов при переменных по методу наименьших квадратов [109]:

$$b_j = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2, & j = 0; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} Y_i^2, & j = 1, 2, 3; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ik} x_{il} x_{im} Y_i^2, & j = 4, \dots, 7, k, l, m = 1, 2, 3, k, k \neq l \neq m; \end{cases} \quad (2.29)$$

где Y_i – среднее значение отклика в i -ой точке спектра плана.

Формулы расчета коэффициентов регрессионной модели представлены в таблице 2.7.

Для оценки дисперсии ошибки регрессии используется формула [109]:

$$S_\varepsilon^2 = \sum_{u=1}^m \sum_{i=1}^N (y^2_{iu} - y^2_{\text{mod } i})^2 / (Nm - d - 1), \quad (2.30)$$

где y_{iu} – отклика в i -ой точке спектра плана в u -м опыте.

Оценка дисперсии для параметров регрессии b в силу свойств матрицы Фишера определяется:

$$S_{b_j}^2 = S_\varepsilon^2 / (Nm), \quad j = 0, 1, \dots, 7. \quad (2.31)$$

Для проверки значимости полученных оценок b применен t -критерий Стьюдента. Расчетное значение t -статистики определялось [109]:

$$t_{b_j} = |b_j| / S_{b_j}, \quad j = 0, 1, \dots, 7. \quad (2.32)$$

Таблица 2.7 – Формулы расчета коэффициентов регрессионной модели

Коэффициент	Формула расчета
b_0	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2$ (2.33)
b_1	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i1} Y_i^2$ (2.34)
b_2	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i2} Y_i^2$ (2.35)
b_3	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i3} Y_i^2$ (2.36)
b_4	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i1} x_{i2} Y_i^2$ (2.37)
b_5	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i1} x_{i3} Y_i^2$ (2.38)
b_6	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i2} x_{i3} Y_i^2$ (2.39)
b_7	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i1} x_{i2} x_{i3} Y_i^2$ (2.40)

Критическое значение t -статистики находилось по таблице при уровне значимости $\alpha = 5\%$ и числу степеней свободы, равному $d.f. = Nm - d - 1$:

$$t_{\text{крит}} = t_{\alpha/2; Nm-d-1}. \quad (2.41)$$

Если $t_{b_j} > t_{\text{крит}}$, то коэффициент b_j является статистически значимым на уровне 5%.

Если коэффициент детерминации R^2 близок к единице, то это свидетель-

ствовало о тесной линейной связи между зависимой и объясняющими переменными. Коэффициент детерминации определялся:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{u=1}^m \sum_{i=1}^N (y_{iu}^2 - y_{\text{mod } i}^2)^2}{\sum_{u=1}^m \sum_{i=1}^N (y_{iu}^2 - \overline{y^2})^2}. \quad (2.42)$$

Для проверки значимости всего уравнения применен F -критерий Фишера. Расчетное значение F -статистики определялось:

$$F = \frac{R^2 / d}{(1 - R^2) / (Nm - d - 1)}. \quad (2.43)$$

Критическое значение F -статистики находилось по таблице при уровне значимости $\alpha = 5\%$ и числам степеней свободы, равным d и $(Nm - d - 1)$:

$$F_{\text{крит}} = F_{\alpha; d; Nm - d - 1}. \quad (2.44)$$

Для анализа результатов экспериментов был применен критерий Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена G определяется по формуле [109]:

$$G = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (2.45)$$

где S_i^2 – оценка дисперсии воспроизводимости опыта:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_{iu} - Y_i)^2}{m - 1}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (2.46)$$

$$S_{\text{max}}^2 = \max_{i=1, \dots, N} S_i^2. \quad (2.47)$$

Критическое значение критерия G_p является табличным значением [109].

Если $G \leq G_p$, то принималась гипотеза об однородности дисперсий и воспроизводимости опыта на уровне значимости α .

Для модели с грунтом «пашня» были рассчитаны коэффициенты регрессии:

$$b_0 = (0,0182 + 0,0043 + \dots + 0,077) / 8 = 0,0406;$$

$$b_1 = ((+1)0,0182 + (-1)0,0043 + (+1)0,0028 + \dots + (-1)0,0077) / 8 = 0,0250;$$

$$b_2 = ((+1)0,0182 + (+1)0,0043 + (-1)0,0028 + \dots + (-1)0,0077) / 8 = 0,0297;$$

$$b_3 = ((+1)0,0182 + (+1)0,0043 + (+1)0,0028 + \dots + (-1)0,0077) / 8 = -0,0341;$$

$$b_4 = ((+1)(+1)0,0182 + (-1)(+1)0,0043 + (+1)(-1)0,0028 + \dots + (-1)(-1)0,0077)/8 = 0,0183;$$

$$b_5 = ((+1)(+1)0,0182 + (-1)(+1)0,0043 + (+1)(+1)0,0028 + \dots + (-1)(-1)0,0077)/8 = -0,0210;$$

$$b_6 = ((+1)(+1)0,0182 + (+1)(+1)0,0043 + (-1)(+1)0,0028 + \dots + (-1)(-1)0,0077)/8 = -0,0250;$$

$$b_7 = ((+1)(+1)(+1)0,0182 + (-1)(+1)(+1)0,0043 + (-1)(-1)(+1)0,0028 + \dots + (-1)(-1)(-1)0,0077)/8 = -0,0153.$$

Тогда уравнение регрессии имеет вид:

$$y^2_{\text{mod}} = 0,0406 + 0,0250x_1 + 0,0297x_2 - 0,0341x_3 + 0,0183x_1x_2 - 0,0210x_1x_3 - 0,0250x_2x_3 - 0,0153x_1x_2x_3 \quad (2.48)$$

Найдем модельные значения y^2_{mod} для проведенных опытов:

$$y^2_{\text{mod}1} = 0,0406 + 0,0250(+1) + 0,0297(+1) - 0,0341(+1) + 0,0183(+1)(+1) - 0,0210(+1)(+1) - 0,0250(+1)(+1) - 0,0153(+1)(+1)(+1) = 0,0182;$$

$$y^2_{\text{mod}2} = 0,0406 + 0,0250(-1) + 0,0297(+1) - 0,0341(+1) + 0,0183(-1)(+1) - 0,0210(-1)(+1) - 0,0250(+1)(+1) - 0,0153(-1)(+1)(+1) = 0,0043;$$

$$y^2_{\text{mod}8} = 0,0406 + 0,0250(-1) + 0,0297(-1) - 0,0341(-1) + 0,0183(-1)(-1) - 0,0210(-1)(-1) - 0,0250(-1)(-1) - 0,0153(-1)(-1)(-1) = 0,0077.$$

Определим дисперсию воспроизводимости:

$$S^2_{\varepsilon} = ((0,0175 - 0,0182)^2 + (0,0186 - 0,0182)^2 + \dots + (0,0077 - 0,0074)^2)/(24-7-1) = 0,00000043.$$

Найдем дисперсию ошибки определения коэффициентов регрессии по (2.31):

$$S^2_{bj} = 0,00000043/(24) = 0,000000018;$$

$$S_{bj} = 0,000134.$$

По выражению (2.32) рассчитаем t -статистику для коэффициентов регрессии: $t_{b0} = 303,3$; $t_{b1} = 186,27$; $t_{b2} = 221,87$; $t_{b3} = 254,7$; $t_{b4} = 136,25$; $t_{b5} = 156,41$; $t_{b6} = 186,31$; $t_{b7} = 114,41$.

Критическое значение t -статистики на уровне значимости 5% и при числе степеней свободы, равном $24-7-1=16$, составляет 2,1199. Все t -статистики при коэффициентах b по модулю больше критического, следовательно, все оценки b статистически значимы на уровне 5%.

Найдем среднее значение квадрата отклика по выборке:

$$\overline{y^2} = (0,0175 + 0,0186 + 0,0185 + \dots + 0,0077) / 24 = 0,0406.$$

Находим коэффициент детерминации по (2.40):

$$R^2 = 0,999933.$$

Коэффициент детерминации близок к единице, что свидетельствует о высокой взаимосвязи между y и переменными $x_1, x_2, x_3, x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3, x_1 x_2 x_3$.

Рассчитаем F -статистику:

$$F = (0,999933/7)/(1 - 0,999933)/(24 - 7 - 1) = 32432,63.$$

Данное значение больше критического $F_{\text{крит}} = F_{0,05;24-7-1} = 2,657$, следовательно, уравнение регрессии в целом статистически значимо на уровне 5%.

Факторы x_1 и x_2 имеют примерно одинаковые положительные коэффициенты (0,0250 и 0,0297), поэтому можно предположить, что они оба оказывают примерно одинаковое положительное воздействие на квадрат отклика y^2 .

Фактор x_3 имеет большую оценку по модулю 0,0341, поэтому он оказывает большее воздействие, чем фактор x_1 или x_2 отдельно.

Коэффициенты при переменных, в которых в качестве множителя имеется x_3 , имеют отрицательный знак. Следовательно, увеличение данного фактора уменьшает отклик y , а уменьшение x_3 , наоборот, увеличивает отклик y .

Совместное действие факторов $x_1 x_2$ имеет оценку 0,0183, что примерно в 1,5 раза меньше эффекта x_1 или x_3 . При этом оно имеет положительный знак.

Совместные действия факторов $x_1 x_2$ и $x_2 x_3$ имеет примерно равные оценки (– 0,0210) и (– 0,0250), что по модулю примерно равно эффекту x_1 или x_2 и превышает эффект $x_1 x_2$.

Таким образом, максимальное значение квадрата отклика может быть получено при положительных значениях (+1) факторов x_1 и x_2 и отрицательном значении (–1) фактора x_3 .

Найдем оценки дисперсии воспроизводимости опыта в соответствии с (2.46): $S_1^2 = 0,00000592$; $S_2^2 = 0,00000549$; $S_3^2 = 0,00000387$; $S_4^2 = 0,00000133$; $S_5^2 = 0,00000301$; $S_6^2 = 0,00000131$; $S_7^2 = 0,00000057$; $S_8^2 = 0,00000091$.

$$S_{AD}^2 = 0,00002243.$$

Наибольшее значение S_i^2 для первого опыта:

$$S_{max}^2 = 0,00000592.$$

По (2.45) вычисляем значение Кохрена:

$$G_p = 0,00000592/0,00002243 = 0,264.$$

Для уровня значимости $q=0,05$ в таблице [109] находим $G_{кр}=0,516$. Так как экспериментальная величина $G_p \leq G_{кр}$ ($0,264 < 0,516$), гипотеза об однородности дисперсии не отвергается.

Отсюда опыты для грунта «пашня» на уровне значимости 5% считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными.

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента для грунта «пашня» можно судить о воздействии давления воздуха в шине, нагрузки, приходящейся на колесо и номера его прохода по образуемой колее на изменение коэффициента сопротивления качению колеса.

Для модели с грунтом «мокрый песок» были рассчитаны коэффициенты регрессии:

$$b_0 = (0,0272 + 0,0155 + \dots + 0,0225)/8 = 0,0749;$$

$$b_1 = ((+1)0,0272 + (-1)0,0155 + (+1)0,0034 + \dots + (-1)0,0225)/8 = 0,0206;$$

$$b_2 = ((+1)0,0272 + (+1)0,0155 + (-1)0,0034 + \dots + (-1)0,0225)/8 = 0,0581;$$

$$b_3 = ((+1)0,0272 + (+1)0,0155 + (+1)0,0034 + \dots + (-1)0,0225)/8 = -0,0629;$$

$$b_4 = ((+1)(+1)0,0272 + (-1)(+1)0,0155 + (+1)(-1)0,0034 + \dots + (-1)(-1)0,0225)/8 = 0,0160;$$

$$b_5 = ((+1)(+1)0,0272 + (-1)(+1)0,0155 + (+1)(+1)0,0034 + \dots + (-1)(-1)0,0225)/8 = -0,0173;$$

$$b_6 = ((+1)(+1)0,0272 + (+1)(+1)0,0155 + (-1)(+1)0,0034 + \dots + (-1)(-1)0,0225)/8 = -0,0488;$$

$$b_7 = ((+1)(+1)(+1)0,0272 + (-1)(+1)(+1)0,0155 + (-1)(-1)(+1)0,0034 + \dots + (-1)(-1)(-1)0,0225)/8 = -0,0134.$$

Тогда уравнение регрессии имеет вид:

$$y_{mod}^2 = 0,0749 + 0,0206x_1 + 0,0581x_2 - 0,0629x_3 + 0,0160x_1x_2 - 0,0173x_1x_3 - 0,0488x_2x_3 - 0,0134x_1x_2x_3 \quad (2.49)$$

Найдем модельные значения $y^2_{\text{мод}}$ для проведенных опытов:

$$y^2_{\text{мод}1} = 0,0749 + 0,0206(+1) + 0,0581(+1) - 0,0629(+1) + 0,0160(+1)(+1) - \\ - 0,0173(+1)(+1) - 0,0488(+1)(+1) - 0,0134(+1)(+1)(+1) = 0,0272;$$

$$y^2_{\text{мод}2} = 0,0749 + 0,0206(-1) + 0,0581(+1) - 0,0629(+1) + 0,0160(-1)(+1) - \\ - 0,0173(-1)(+1) - 0,0488(+1)(+1) - 0,0134(-1)(+1)(+1) = 0,0155;$$

$$y^2_{\text{мод}8} = 0,0749 + 0,0206(-1) + 0,0581(-1) - 0,0629(-1) + 0,0160(-1)(-1) - \\ - 0,0173(-1)(-1) - 0,0488(-1)(-1) - 0,0134(-1)(-1)(-1) = 0,0225.$$

Определим дисперсию воспроизводимости:

$$S^2_{\varepsilon} = ((0,0262 - 0,0272)^2 + (0,0265 - 0,0272)^2 + \dots + (0,0222 - 0,0225)^2) / (24 - 7 - 1) = \\ = 0,00000727.$$

Найдем дисперсию ошибки определения коэффициентов регрессии по (2.31):

$$S^2_{bj} = 0,00000727 / (24) = 0,0000003;$$

$$S_{bj} = 0,00055.$$

По выражению (2.32) рассчитаем t -статистику для коэффициентов регрессии: $t_{b0} = 136,16$; $t_{b1} = 37,48$; $t_{b2} = 105,48$; $t_{b3} = 114,32$; $t_{b4} = 29,04$; $t_{b5} = 31,47$; $t_{b6} = 88,57$; $t_{b7} = 24,38$.

Критическое значение t -статистики на уровне значимости 5% и при числе степеней свободы, равном $24 - 7 - 1 = 16$, составляет 2,1199. Все t -статистики при коэффициентах b по модулю больше критического, следовательно, все оценки b статистически значимы на уровне 5%.

Найдем среднее значение квадрата отклика по выборке:

$$\overline{y^2} = (0,0262 + 0,0265 + 0,0289 + \dots + 0,0222) / 24 = 0,0749.$$

Находим коэффициент детерминации по (2.40):

$$R^2 = 0,9999554.$$

Коэффициент детерминации близок к единице, что свидетельствует о высокой взаимосвязи между y и переменными $x_1, x_2, x_3, x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3, x_1 x_2 x_3$.

Рассчитаем F -статистику:

$$F = (0,9999554 / 7) / (1 - 0,9999554) / (24 - 7 - 1) = 5124,742.$$

Данное значение больше критического $F_{\text{крит}} = F_{0,05;24-7-1} = 2,657$, следовательно-

но, уравнение регрессии в целом статистически значимо на уровне 5%.

Факторы x_1 и x_2 имеют положительные коэффициенты (0,0206 и 0,0581), при этом оценка для фактора x_2 почти в 3 раза больше, чем для фактора x_1 .

Фактор x_3 имеет наибольшую оценку по модулю 0,0629, поэтому он оказывает большее воздействие, чем фактор x_1 и сопоставим по степени влияния к x_2 отдельно.

Коэффициенты при переменных, в которых в качестве множителя имеется x_3 , имеют отрицательный знак. Значит, увеличение данного фактора x_3 уменьшает отклик y , а уменьшение x_3 , наоборот, увеличивает y .

Совместное действие факторов x_1x_2 , x_1x_3 примерно в 3 раза меньше, чем оценка раздельного влияния для факторов x_2 и x_3 . Совместное действие факторов x_2x_3 почти в 1,5 раза меньше, чем оценка раздельного влияния для факторов x_2 и x_3 . Совместное действие 3 факторов $x_1x_2x_3$ близко к по степени влияния к фактору x_1x_3 .

Таким образом, максимальное значение квадрата отклика y может быть получено при положительных значениях (+1) факторов x_1 и x_2 и отрицательном значении (-1) фактора x_3 .

Найдем оценки дисперсии воспроизводимости опыта в соответствии с (2.46): $S_1^2 = 0,00002044$; $S_2^2 = 0,000007$; $S_3^2 = 0,00002317$; $S_4^2 = 0,00000292$; $S_5^2 = 0,00003508$; $S_6^2 = 0,00001425$; $S_7^2 = 0,00000559$; $S_8^2 = 0,00000471$.

$$S_{AD}^2 = 0,00011316.$$

Наибольшее значение S_i^2 для пятого опыта:

$$S_{max}^2 = 0,00003508.$$

По (2.45) вычисляем значение Кохрена:

$$G_p = 0,00003508/0,00011316 = 0,310.$$

Для уровня значимости $q=0,05$ в таблице [109] находим $G_{кр}=0,516$. Так как экспериментальная величина $G_p \leq G_{кр}$ ($0,310 < 0,516$), гипотеза об однородности дисперсии не отвергается.

Отсюда опыты для грунта «мокрый песок» на уровне значимости 5% считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными.

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента для грунта

«мокрый песок» можно судить о воздействии давления воздуха в шине, нагрузки, приходящейся на колесо и номера его прохода по образуемой колее на изменение коэффициента сопротивления качению колеса.

Для модели с грунтом «суглинок-20» были рассчитаны коэффициенты регрессии:

$$b_0 = (0,0111 + 0,0045 + \dots + 0,0058)/8 = 0,0137;$$

$$b_1 = ((+1)0,0111 + (-1)0,0045 + (+1)0,0032 + \dots + (-1)0,0058)/8 = 0,0058;$$

$$b_2 = ((+1)0,0111 + (+1)0,0045 + (-1)0,0032 + \dots + (-1)0,0058)/8 = 0,0076;$$

$$b_3 = ((+1)0,0111 + (+1)0,0045 + (+1)0,0032 + \dots + (-1)0,0058)/8 = 0,0087;$$

$$b_4 = ((+1)(+1)0,0111 + (-1)(+1)0,0045 + (+1)(-1)0,0032 + \dots + (-1)(-1)0,0058)/8 = 0,0032;$$

$$b_5 = ((+1)(+1)0,0111 + (-1)(+1)0,0045 + (+1)(+1)0,0032 + \dots + (-1)(-1)0,0058)/8 = -0,0037;$$

$$b_6 = ((+1)(+1)0,0111 + (+1)(+1)0,0045 + (-1)(+1)0,0032 + \dots + (-1)(-1)0,0058)/8 = -0,0048;$$

$$b_7 = ((+1)(+1)(+1)0,0111 + (-1)(+1)(+1)0,0045 + (-1)(-1)(+1)0,0032 + \dots + (-1)(-1)(-1)0,0058)/8 = -0,002.$$

Тогда уравнение регрессии имеет вид:

$$y^2_{\text{mod}} = 0,0137 + 0,0058x_1 + 0,0076x_2 - 0,0087x_3 + 0,0032x_1x_2 - 0,0037x_1x_3 - 0,0048x_2x_3 - 0,002x_1x_2x_3 \quad (2.50)$$

Найдем модельные значения y^2_{mod} для проведенных опытов:

$$y^2_{\text{mod}1} = 0,0137 + 0,0058(+1) + 0,0076(+1) - 0,0087(+1) + 0,0032(+1)(+1) - 0,0037(+1)(+1) - 0,0048(+1)(+1) - 0,002(+1)(+1)(+1) = 0,0111;$$

$$y^2_{\text{mod}2} = 0,0137 + 0,0058(-1) + 0,0076(+1) - 0,0087(+1) + 0,0032(-1)(+1) - 0,0037(-1)(+1) - 0,0048(+1)(+1) - 0,002(-1)(+1)(+1) = 0,0045;$$

...

$$y^2_{\text{mod}8} = 0,0137 + 0,0058(-1) + 0,0076(-1) - 0,0087(-1) + 0,0032(-1)(-1) - 0,0037(-1)(-1) - 0,0048(-1)(-1) - 0,002(-1)(-1)(-1) = 0,0058;$$

Определим дисперсию воспроизводимости:

$$S^2_{\varepsilon} = ((0,0104 - 0,0111)^2 + (0,0113 - 0,0111)^2 + \dots + (0,0058 - 0,0058)^2) / (24 - 7 - 1) = 0,00000019.$$

Найдем дисперсию ошибки определения коэффициентов регрессии по (2.31):

$$S^2_{bj} = 0,00000019 / (24) = 0,0000000079;$$

$$S_{bj} = 0,000089.$$

По выражению (2.32) рассчитаем t -статистику для коэффициентов регрессии: $t_{b0} = 154,51$; $t_{b1} = 64,96$; $t_{b2} = 85,91$; $t_{b3} = 97,97$; $t_{b4} = 36,13$; $t_{b5} = 41,2$; $t_{b6} = 54,47$; $t_{b7} = 22,92$.

Критическое значение t -статистики на уровне значимости 5% и при числе степеней свободы, равном $24 - 7 - 1 = 16$, составляет 2,1199. Все t -статистики при коэффициентах b по модулю больше критического, следовательно, все оценки b статистически значимы на уровне 5%.

Найдем среднее значение квадрата отклика по выборке:

$$\overline{y^2} = (0,0104 + 0,0113 + 0,0116 + \dots + 0,0058) / 24 = 0,0137.$$

Находим коэффициент детерминации по (2.42):

$$R^2 = 0,9999423.$$

Коэффициент детерминации близок к единице, что свидетельствует о высокой взаимосвязи между y и переменными $x_1, x_2, x_3, x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3, x_1 x_2 x_3$.

Рассчитаем F -статистику:

$$F = (0,9999423 / 7) / (1 - 0,9999423) / (24 - 7 - 1) = 3956,22.$$

Данное значение больше критического $F_{\text{крит}} = F_{0,05;24-7-1} = 2,657$, следовательно, уравнение регрессии в целом статистически значимо на уровне 5%.

Факторы x_1 и x_2 имеют положительные коэффициенты (0,0058 и 0,0076), при этом степень воздействия фактора x_2 на квадрат отклика y в 1,5 раза выше, чем фактора x_1 .

Фактор x_3 имеет наибольшую оценку по модулю 0,0087, поэтому он оказывает большое воздействие, чем фактор x_1 или x_2 отдельно.

Коэффициенты при переменных, в которых в качестве множителя имеется x_3 , имеют отрицательный знак. Значит, увеличение данного фактора x_3 уменьшает квадрат отклика y , а уменьшение x_3 , наоборот, увеличивает y .

Совместное действие факторов x_1x_2 , x_1x_3 примерно в 2 раза меньше, чем оценка раздельного влияния для факторов x_2 и x_3 . Совместное действие факторов x_2x_3 почти в 1,5 раза меньше, чем оценка раздельного влияния для факторов x_2 и x_3 . Совместное действие 3 факторов $x_1x_2x_3$ практически в 3 раза слабее раздельного влияния каждого фактора.

Таким образом, максимальное значение квадрата отклика y может быть получено при положительных значениях (+1) факторов x_1 и x_2 и отрицательном значении (-1) фактора x_3 .

Найдем оценки дисперсии воспроизводимости опыта в соответствии с (2.44): $S_1^2 = 0,00000873$; $S_2^2 = 0,00001183$; $S_3^2 = 00000325$; $S_4^2 = 0,00000679$; $S_5^2 = 0,00000219$; $S_6^2 = 0,00000172$; $S_7^2 = 0,00000247$; $S_8^2 = 0,00000588$.

$$S_{AD}^2 = 0,00004286.$$

Наибольшее значение S_i^2 для второго опыта:

$$S_{max}^2 = 0,00001183.$$

По (2.45) вычисляем значение Кохрена:

$$G_p = 0,00001183/0,00004286 = 0,276.$$

Для уровня значимости $q=0,05$ в таблице [109] находим $G_{кр}=0,516$. Так как экспериментальная величина $G_p \leq G_{кр}$ ($0,276 < 0,516$), гипотеза об однородности дисперсии не отвергается.

Отсюда опыты для грунта «суглинок-20» на уровне значимости 5% считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными.

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента для грунта «суглинок-20» можно судить о воздействии давления воздуха в шине, нагрузки, проходящей на колесо и номера его прохода по образуемой колее на изменение коэффициента сопротивления качению колеса.

Для модели с грунтом «суглинок-35» были рассчитаны коэффициенты регрессии:

$$b_0 = (0,0263 + 0,0256 + \dots + 0,0188)/8 = 0,0298;$$

$$b_1 = ((+1)0,0263 + (-1)0,0256 + (+1)0,0075 + \dots + (-1)0,0188)/8 = 0,0004;$$

$$b_2 = ((+1)0,0263 + (+1)0,0256 + (-1)0,0075 + \dots + (-1)0,0188)/8 = 0,0166;$$

$$b_3 = ((+1)0,0263 + (+1)0,0256 + (+1)0,0075 + \dots + (-1)0,0188)/8 = -0,0131;$$

$$b_4 = ((+1)(+1)0,0263 + (-1)(+1)0,0256 + (+1)(-1)0,0075 + \dots + (-1)(-1)0,0188)/8 = 0,0002;$$

$$b_5 = ((+1)(+1)0,0263 + (-1)(+1)0,0256 + (+1)(+1)0,0075 + \dots + (-1)(-1)0,0188)/8 = -0,0002;$$

$$b_6 = ((+1)(+1)0,0263 + (+1)(+1)0,0256 + (-1)(+1)0,0075 + \dots + (-1)(-1)0,0188)/8 = -0,0073;$$

$$b_7 = ((+1)(+1)(+1)0,0263 + (-1)(+1)(+1)0,0256 + (-1)(-1)(+1)0,0075 + \dots + (-1)(-1)(-1)0,0188)/8 = -0,0001.$$

Тогда уравнение регрессии имеет вид:

$$y^2_{\text{mod}} = 0,0298 + 0,0004x_1 + 0,0166x_2 - 0,0131x_3 + 0,0002x_1x_2 - 0,0002x_1x_3 - 0,0073x_2x_3 - 0,0001x_1x_2x_3 \quad (2.51)$$

Найдем модельные значения y^2_{mod} для проведенных опытов:

$$y^2_{\text{mod}1} = 0,0298 + 0,0004(+1) + 0,0166(+1) - 0,0131(+1) + 0,0002(+1)(+1) - 0,0002(+1)(+1) - 0,0073(+1)(+1) - 0,0001(+1)(+1)(+1) = 0,0263;$$

$$y^2_{\text{mod}2} = 0,0298 + 0,0004(-1) + 0,0166(+1) - 0,0131(+1) + 0,0002(-1)(+1) - 0,0002(-1)(+1) - 0,0073(+1)(+1) - 0,0001(-1)(+1)(+1) = 0,0256;$$

...

$$y^2_{\text{mod}8} = 0,0298 + 0,0004(-1) + 0,0166(-1) - 0,0131(-1) + 0,0002(-1)(-1) - 0,0002(-1)(-1) - 0,0073(-1)(-1) - 0,0001(-1)(-1)(-1) = 0,0188;$$

Определим дисперсию воспроизводимости:

$$S^2_{\varepsilon} = ((0,0259 - 0,0263)^2 + (0,0271 - 0,0263)^2 + \dots + (0,0203 - 0,0188)^2) / (24 - 7 - 1) = 0,00000081.$$

Найдем дисперсию ошибки определения коэффициентов регрессии по (2.31):

$$S^2_{bj} = 0,00000081 / (24) = 0,00000034;$$

$$S_{bj} = 0,000183.$$

По выражению (2.32) рассчитаем t -статистику для коэффициентов регрессии:

$$t_{b0} = 162,54; t_{b1} = 2,38; t_{b2} = 90,37; t_{b3} = 71,53; t_{b4} = 1,35; t_{b5} = 1,01; t_{b6} = 39,79; t_{b7} = 0,61.$$

Критическое значение t -статистики на уровне значимости 5% и при числе степеней свободы, равном $24 - 7 - 1 = 16$, составляет 2,1199. t -статистики при коэф-

коэффициентах b за исключением t -статистик для коэффициентов b_4, b_5, b_7 по модулю больше критического, значит, коэффициенты b , кроме b_4, b_5, b_7 , статистически значимы на уровне 5%. Таким образом, статистически незначимыми на уровне 5% являются оценки коэффициентов для совместного действия факторов x_1x_2, x_1x_3 и $x_1x_2x_3$, остальные оценки коэффициентов значимы на уровне 5%.

Найдем среднее значение квадрата отклика по выборке:

$$\overline{y^2} = (0,0259 + 0,0271 + 0,026 + \dots + 0,0203)/24 = 0,0298.$$

Находим коэффициент детерминации по (2.42):

$$R^2 = 0,998926.$$

Коэффициент детерминации близок к единице, что свидетельствует о высокой взаимосвязи между y и переменными $x_1, x_2, x_3, x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$.

Рассчитаем F -статистику:

$$F = (0,998926/7)/(1 - 0,998926)/(24 - 7 - 1) = 2125,266.$$

Данное значение больше критического $F_{\text{крит}} = F_{0,05;24-7-1} = 2,657$, следовательно, уравнение регрессии в целом статистически значимо на уровне 5%.

Фактор x_2 имеет наибольшую оценку по модулю 0,0166, но он практически одинаков по степени влияния с фактором x_3 (его оценка равна $-0,0131$).

Фактор x_1 имеет коэффициент 0,0004, что на порядок меньше значений для других переменных, однако этот коэффициент является статистически значимым на уровне 5%.

Коэффициенты при переменных, в которых в качестве множителя имеется x_3 , имеют отрицательный знак. Значит, увеличение данного фактора x_3 уменьшает квадрат отклик y , а уменьшение x_3 , наоборот, увеличивает y .

Совместное действие факторов x_2x_3 примерно в 1,5 раза меньше, чем оценка отдельного влияния для факторов x_2 и x_3 .

Совместное действие факторов $x_1x_3, x_1x_2, x_1x_2x_3$ на два порядка меньше, чем оценка отдельного влияния для факторов x_2 и x_3 , при этом соответствующие коэффициенты являются незначимыми на уровне 5%. Отсюда можно сделать вывод, что эффект значимого фактора x_1 «забывается» влиянием факторов x_2 и x_3 с более высокими коэффициентами.

Таким образом, максимальное значение квадрата отклика y может быть получено при положительных значениях (+1) факторов x_1 и x_2 и отрицательном значении (-1) фактора x_3 .

Найдем оценки дисперсии воспроизводимости опыта в соответствии с (2.46): $S_1^2 = 0,00000873$; $S_2^2 = 0,00000481$; $S_3^2 = 00001477$; $S_4^2 = 0,00000229$; $S_5^2 = 0,00000676$; $S_6^2 = 0,00000412$; $S_7^2 = 0,00000196$; $S_8^2 = 0,00002521$.

$$S_{AD}^2 = 0,00006425.$$

Наибольшее значение S_i^2 для восьмого опыта:

$$S_{max}^2 = 0,00002521.$$

По (2.45) вычисляем значение Кохрена:

$$G_p = 0,00002521/0,00006425 = 0,392.$$

Для уровня значимости $q=0,05$ в таблице [109] находим $G_{кр}=0,516$. Так как экспериментальная величина $G_p \leq G_{кр}$ ($0,392 < 0,516$), гипотеза об однородности дисперсии не отвергается.

Отсюда опыты для грунта «суглинок-35» на уровне значимости 5% считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий однородными.

Таким образом, по результатам проведенного эксперимента для грунта «суглинок-35» можно судить о воздействии давления воздуха в шине, нагрузки, проходящей на колесо и номера его прохода по образуемой колее на изменение коэффициента сопротивления качению колеса.

2.2.3 Результаты лабораторного исследования

Анализ результатов проведенного лабораторного экспериментального исследования позволил выявить характер влияния на коэффициент сопротивления качению нормальной нагрузки, давления воздуха, номера прохода колеса по грунтовому основанию (рисунки 2.9–2.12), установить функциональную зависимость от этих параметров и определить значения соответствующих коэффициентов кор-

рекции коэффициента сопротивления качению для каждого типа грунта, по которому осуществлялось исследование качения колеса.

Общий вид функциональной зависимости коэффициента сопротивления качению описывается уравнением (2.10), при этом для каждого типа грунта коэффициенты коррекции коэффициента сопротивления качению имеют значение:

1. Для грунтового основания «пашня»: $k_0 = -0,0008381$; $k_1 = -0,0650083(1/\text{МПа})$; $k_2 = 0,0000031(1/\text{Н})$; $k_3 = 0,0002618$; $k_4 = 0,0002446(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$; $k_5 = 0,0203731(1/\text{МПа})$; $k_6 = -0,000001(1/\text{Н})$; $k_7 = -0,0000766(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$;

2. Для грунтового основания «мокрый песок»: $k_0 = -0,019127$; $k_1 = -0,0895536(1/\text{МПа})$; $k_2 = 0,0000457(1/\text{Н})$; $k_3 = 0,005996$; $k_4 = 0,0002141(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$; $k_5 = 0,0284891(1/\text{МПа})$; $k_6 = -0,0000143(1/\text{Н})$; $k_7 = 0,0000671(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$;

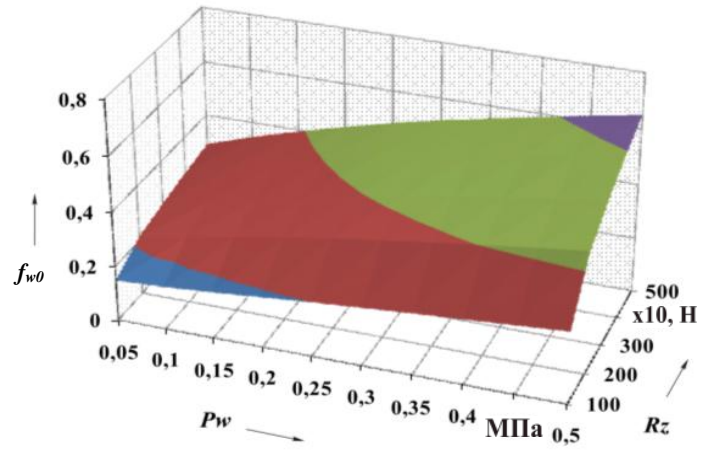
3. Для грунтового основания «суглинок-20»: $k_0 = 0,019103$; $k_1 = 0,0217368(1/\text{МПа})$; $k_2 = 0,0000032(1/\text{Н})$; $k_3 = (-0,005361)$; $k_4 = 0,0000364(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$; $k_5 = -0,0060687(1/\text{МПа})$; $k_6 = -0,0000009(1/\text{Н})$; $k_7 = -0,0000102(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$;

4. Для грунтового основания «суглинок-35»: $k_0 = 0,0090937$; $k_1 = 0,0012769(1/\text{МПа})$; $k_2 = 0,0000152(1/\text{Н})$; $k_3 = -0,0021303$; $k_6 = -0,0000036(1/\text{Н})$.

Анализ проведенного лабораторного исследования качения колеса по грунтовому основанию позволяет сделать вывод, что P_w и R_z оказывают приблизительно одинаковое воздействие на изменение f_{w0} , но при этом n оказывает большее воздействие, чем P_w и R_z отдельно. С увеличением n значение f_{w0} для всех рассмотренных грунтов уменьшается.

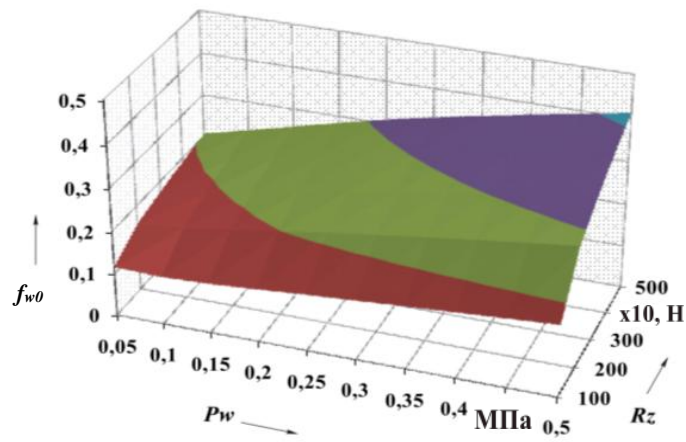
2.3 Выводы

1. В работе разработана математическая модель движения АМН по ДОП с учетом функциональной зависимости коэффициента сопротивления качению от ряда факторов: давления воздуха в шинах, номера прохода колеса по колее, нагрузки на колеса, – влияние которых учитывается функциональной



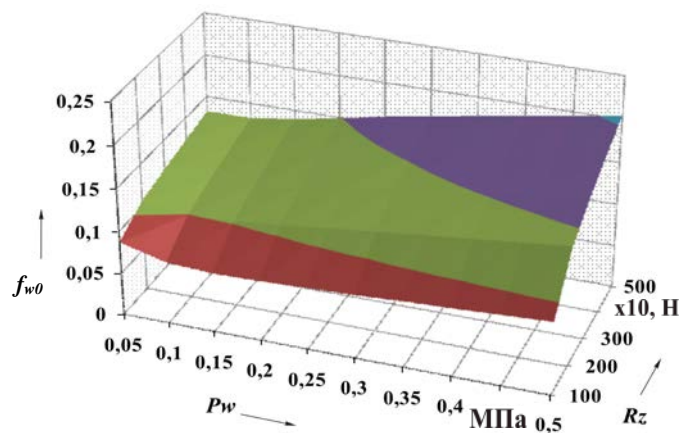
■ 0-0,2 ■ 0,2-0,4 ■ 0,4-0,6 ■ 0,6-0,8

$n = 1$



■ 0-0,1 ■ 0,1-0,2 ■ 0,2-0,3 ■ 0,3-0,4 ■ 0,4-0,5

$n = 2$



■ 0-0,05 ■ 0,05-0,1 ■ 0,1-0,15 ■ 0,15-0,2 ■ 0,2-0,25

$n = 3$

Рисунок 2.9 – Результаты лабораторного экспериментального исследования зависимости f_{w0} от P_w , R_z и n для грунтового основания «пашня».

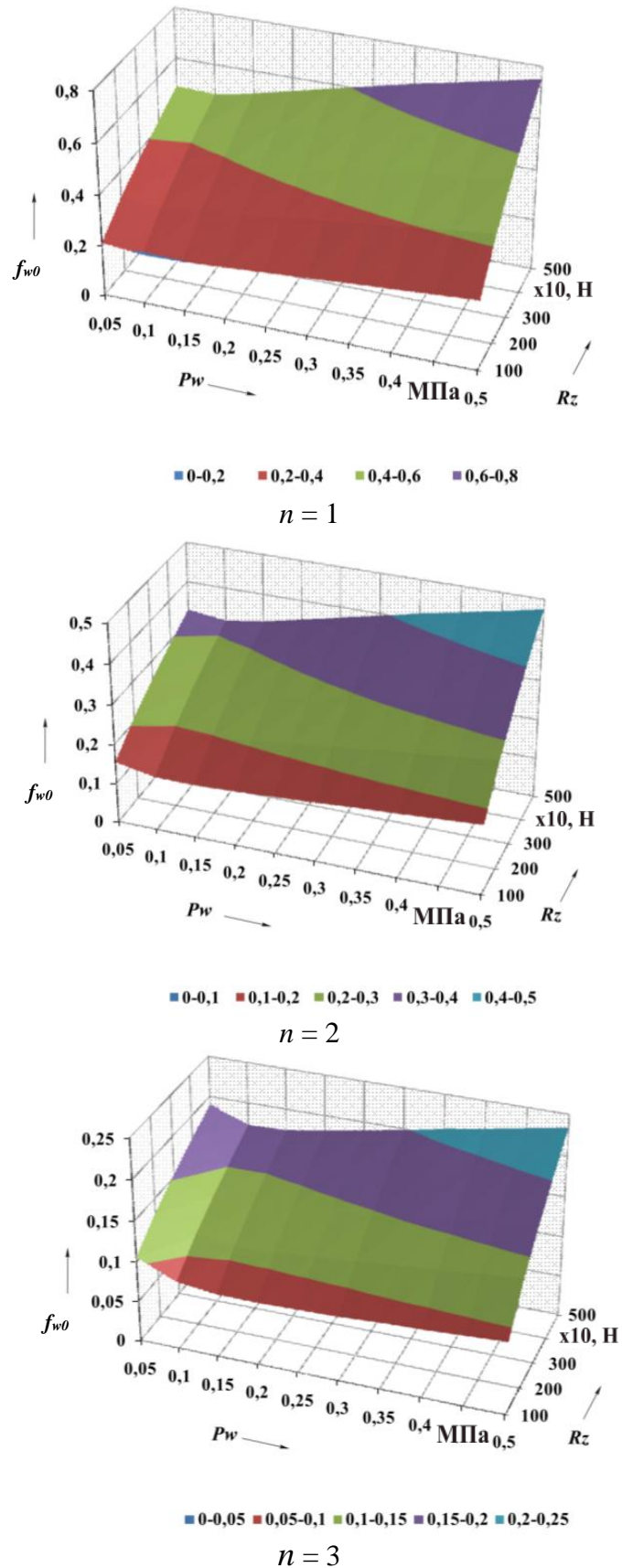


Рисунок 2.10 – Результаты лабораторного экспериментального исследования зависимости f_{w0} от P_w , R_z и n для грунтового основания «мокрый песок».

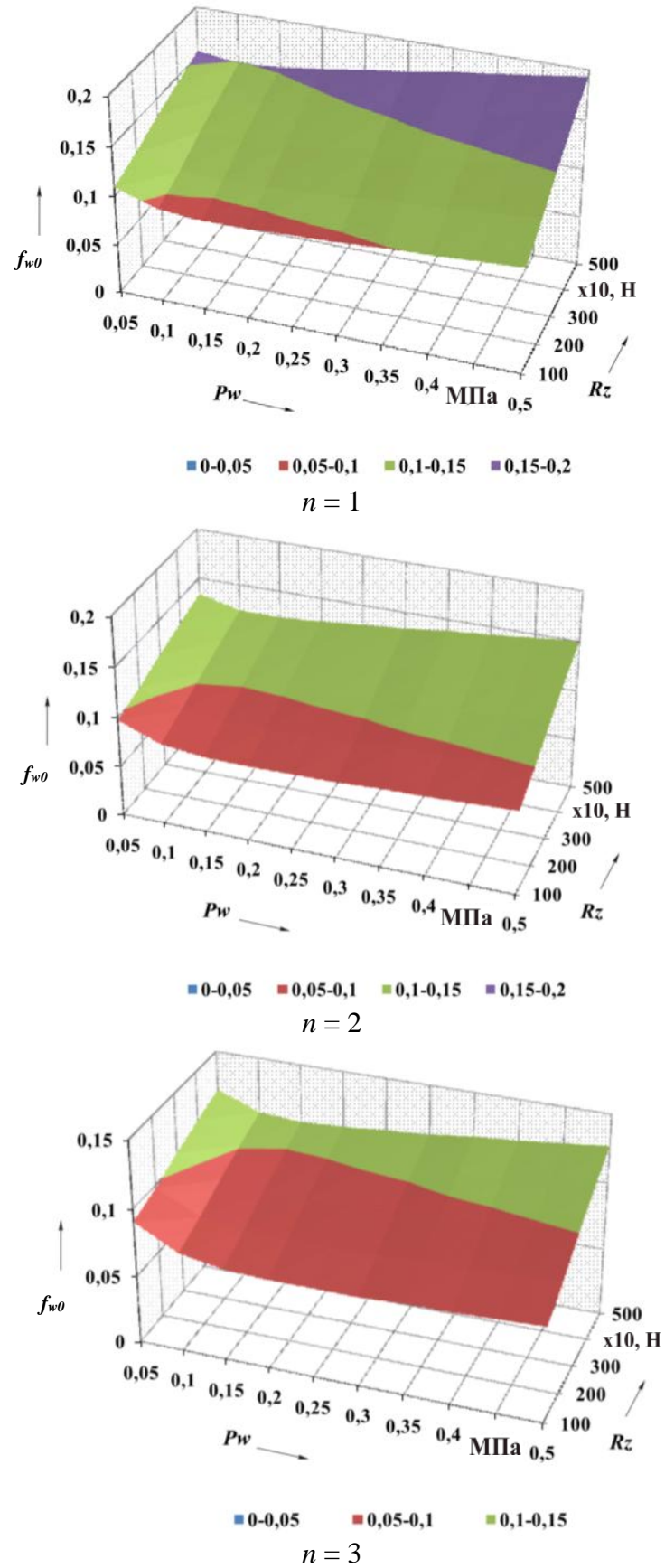
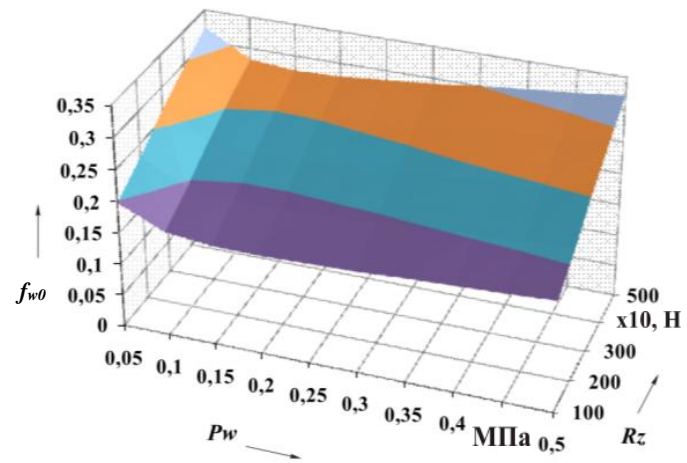
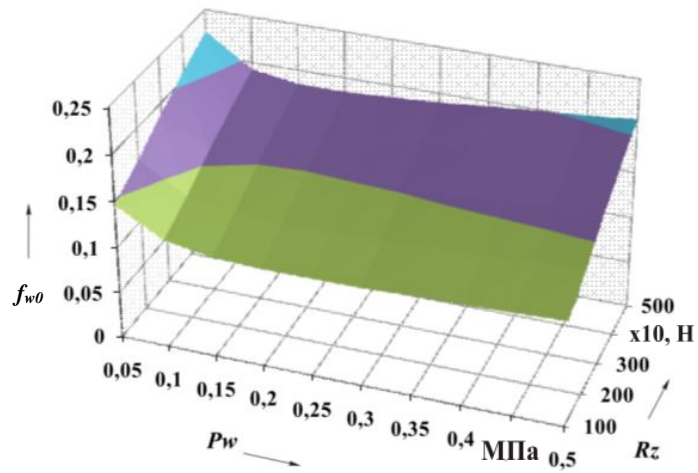


Рисунок 2.11 – Результаты лабораторного экспериментального исследования зависимости f_{w0} от P_w , R_z и n для грунтового основания «суглинок-20».



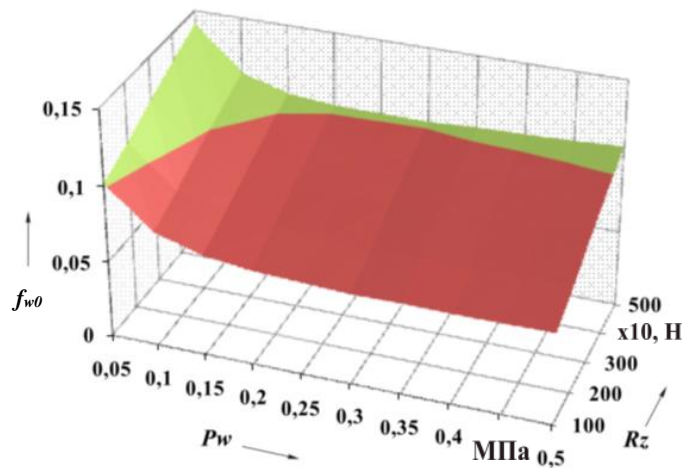
■ 0-0,05 ■ 0,05-0,1 ■ 0,1-0,15 ■ 0,15-0,2 ■ 0,2-0,25 ■ 0,25-0,3 ■ 0,3-0,35

$n = 1$



■ 0-0,05 ■ 0,05-0,1 ■ 0,1-0,15 ■ 0,15-0,2 ■ 0,2-0,25

$n = 2$



■ 0-0,05 ■ 0,05-0,1 ■ 0,1-0,15

$n = 3$

Рисунок 2.12 – Результаты лабораторного экспериментального исследования зависимости f_{w0} от P_w , R_z и n для грунтового основания «суглинок-35».

зависимостью коэффициента сопротивления качению, полученной экспериментальным путем.

2. Выбранная методика и разработанный измерительно-регистрирующий комплекс позволили провести лабораторные экспериментальные исследования качения колеса по деформируемым опорным поверхностям с учетом варьирования нагрузки на него, давления воздуха в шине и номера прохода при последовательных прокатах по образуемой колее, которые можно признать воспроизводимыми по всем регистрировавшимся параметрам во всех вариантах испытаний при доверительной вероятности $P = 0,95$.

3. Проведенные лабораторные исследования позволили определить функциональную зависимость значения коэффициента сопротивления качению от нагрузки, приходящейся на колесо, давления воздуха в шине и номера последовательного прохода, при качении колеса по выбранным грунтовым поверхностям, а также значения коэффициентов коррекции коэффициента сопротивления качению k .

4. Анализ проведенного лабораторного исследования качения колеса по деформируемому грунтовому основанию позволяет сделать вывод, что давление воздуха в шине и вертикальная нагрузка на колесо оказывают существенное влияние на изменение коэффициента сопротивления качению. При этом коэффициент сопротивления качению уменьшается при снижении давления воздуха в шине и при каждом последующем проходе колеса по образуемой колее. Номер прохода колеса оказывает большее воздействие, чем отдельно варьируемые давление воздуха и вертикальная нагрузка. С увеличением числа проходов колеса по колее, при варьировании давлением воздуха в шине и вертикальной нагрузки, значение коэффициента сопротивления качению для всех рассмотренных грунтов уменьшается.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Цель, задачи и методика экспериментального исследования

В основу экспериментальной оценки результатов проведенного теоретического исследования положена методика, основанная на РТМ 37.001.053–2000 «Методы определения параметров проходимости военной автомобильной техники», РТМ 37.001.039–77 «Типовая программа и методы испытаний полноприводных АМН на проходимость», методиках оценки подвижности АМН в полевых условиях, предложенных Я.С. Агейкиным [4, 5], и дополнена исходя из:

- особенностей предлагаемого способа повышения проходимости АМН;
- научных задач, определенных теоретическим исследованием;
- параметров, необходимых для оценки адекватности математической модели и эффективности предлагаемых решений.

Задача натурального экспериментального исследования – проведение сравнительного анализа проходимости АМН в различных грунтовых условиях по критериям и параметрам, рекомендуемым заводом-изготовителем и по предлагаемому способу децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах.

Цели эксперимента:

- 1) оценка адекватности математической модели движения АМН по ДОП;
- 2) оценка эффективности предлагаемого способа повышения проходимости АМН путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах в функции от нагрузки, приходящейся на колеса, и конструктивного их расположения в схеме КД автомобиля.

В качестве показателей, характеризующих проходимость АМН и позволяющих провести объективную сравнительную оценку в работе выбраны следующие:

- максимальная сила тяги на крюке;

– расход топлива в заданных дорожных условиях.

Испытаниям подвергался образец АМН КАМАЗ-5350, прошедший обкатку, очередное техническое обслуживание и контроль технического состояния. Техническое состояние объекта исследований находилось в пределах норм, соответствующих техническим условиям завода-изготовителя, нормативно-технической и эксплуатационной документации. Пробег автомобиля на начало исследования составил 7134 км.

Для проведения испытаний автомобиль снаряжался в соответствии с технической документацией, на нем устанавливался измерительно-регистрирующий комплекс и определялись его весовые параметры путем последовательного взвешивания при наезде на платформу весов колесами передней оси и задней тележки АМН. Достижение максимальной точности при определении полной массы АМН и ее распределения по колесам переднего моста и задней тележки определялось троекратным взвешиванием с последующим получением средних значений.

По результатам взвешивания АМН полная масса составила 15890 кг. Распределение массы по осям:

- передняя ось – 5240 кг;
- задняя тележка – 10650 кг.

Применяемые эксплуатационные материалы соответствовали требованиям «Руководства по эксплуатации автомобилей КАМАЗ семейства Мустанг» [2].

На автомобиле были установлены шины 425/85R21 модели «КАМА-1260» 146J, пневматические, с нормой слойности 14, с регулируемым давлением воздуха, с рисунком протектора повышенной проходимости, без видимых внешних повреждений, с износом рисунка протектора не более 5 % от первоначальной высоты. Давление воздуха в шинах в процессе проведения испытаний изменялось в диапазоне от минимального (0,08 МПа) до соответствующего максимальной нагрузке (0,45 МПа).

Этапу проведения испытаний предшествовал контрольный пробег образца по маршруту протяженностью не менее 50 км и средней скорости движения до 60 км/ч для прогрева агрегатов до установившегося теплового режима.

Для решения поставленных задач проводились измерение и регистрация следующих параметров:

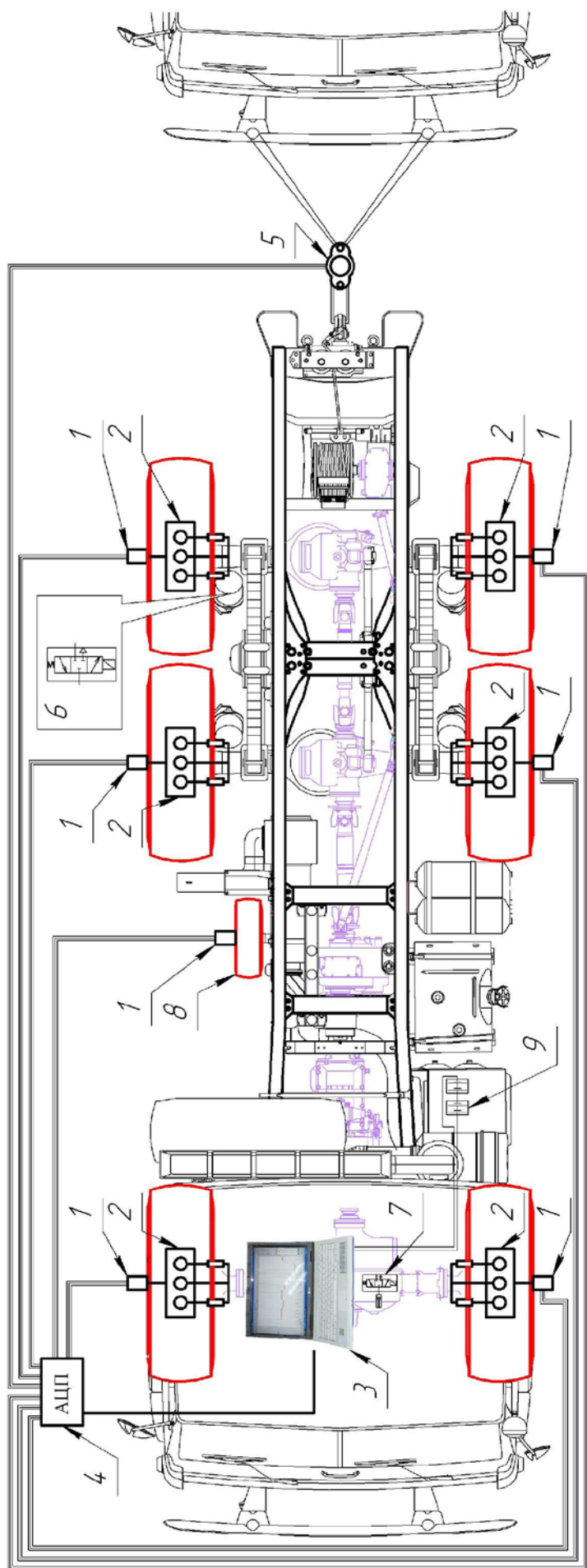
- крутящих моментов на ведущих колесах;
- частоты вращения ведущих колес;
- силы тяги на крюке АМН;
- пройденного АМН пути;
- расхода топлива.

Измерение вышеперечисленных параметров проводилось на основе методики электрических измерений неэлектрических величин с синхронизацией процесса регистрации. Непрерывность измерительного процесса и процесса фиксации параметров осуществлялась с помощью измерительно-регистрирующего комплекса, включающего:

- персональную электронно-вычислительную машину;
- измерительный узел типа «пятое колесо»;
- аналого-цифровой преобразователь L-Card E14-140;
- расходомер топлива «Порт-1»;
- кольцевое тяговое тензометрическое звено;
- тензометрические датчики;
- усилитель AD623;
- датчики частоты вращения индукционного типа;
- торцевые токосъемники.

На рисунке 3.1 представлена схема измерительно-регистрирующего комплекса.

С использованием тензометрических резисторов ФКРА-20-100ГВ проводилось измерение крутящих моментов. Тензометрические резисторы ФКРА-20-100ГВ крепились клеевым способом на полуоси испытуемого образца АМН (рисунк 3.6). Для исключения изгибных деформаций и обеспечения температурной компенсации при проведении испытаний подключение тензометрических резисторов полумоста осуществлялось двуплечевым способом с углом крепления 90° .



1 – торцевые токосъемники ТРАК-4 с индукционными датчиками числа оборотов, 2 – тензометрические датчики ФКРА-20-10ГВ; 3 – ПЭВМ (ноутбук); 4 – аналогово-цифровой преобразователь L-Card E14-140; 5 – тензометрическое звено; 6 – электропневмоклапаны ограничения буксования; 7 – электропневмоклапан ограничения подачи топлива; 8 – измерительное («пятное») колесо; 9 – две аккумуляторные батареи 6 СТ-190 ТРМ.

Рисунок 3.1 – Схема измерительно-регистрающего комплекса.

Размещение измерительной аппаратуры представлено на рисунках 3.2–3.5.

Роль элемента усиления возлагалась на второй полумост. С целью усиления чувствительности аппаратуры измерения к крутящему моменту на удалении до 85 мм от торцевых краев полуосей испытуемого образца АМН была произведена проточка опоясывающих кольцевых канавок шириной 50 мм и глубиной 3 мм. В местах крепления тензометрических резисторов были высверлены поперечные отверстия диаметром 4 мм, а вдоль полуосей – диаметром 6 мм, которые обеспечили вывод проводки к концевым токосъемникам.

Балансировка тензометрического моста осуществлялась усилителем AD623 (рисунок 3.7).

Измерение тягового усилия до 50000 Н на крюке испытуемого образца АМН производилось с использованием кольцевого тягового тензометрического звена (рисунок 3.2, 3.4), представляющего собой стальное кольцо с прикрепленными к его внутренней поверхности методом наклейки тензометрическими датчиками. Снятие электрических сигналов с тензометрических датчиков, прикрепленных к полуосям, и их электропитание производилось с использованием ртутно-амальгамированных токосъемников ТРАК-4 и ТРАК-8, представленных на рисунке 3.3. К испытуемому образцу АМН токосъемники крепились кронштейнами, а с использованием металлического переходника и полимерной трубки подвижная часть токосъемника соединялась с полуосью.

Датчиками индукционного типа, генераторы импульсов которых встроены в токосъемники ТРАК (рисунок 3.8), осуществлялось измерение угловой скорости вращения ведущих колес.

Измерение протяженности пройденного участка пути и скорости движения испытуемого образца АМН производилось с использованием измерительного узла типа «пятое колесо». Конструктивно «пятое колесо» состоит из колеса диаметром 350 мм, установленного на вилке в сборе с вертикальным кронштейном, на оси которого установлен тахогенератор индукторного типа ЦМИС с прерывателем, помещенными в дюралюминиевый корпус. Крепление колеса осуществлялось к тягово-сцепному устройству испытуемого образца АМН.



Рисунок 3.2 – Кольцевое тяговое тензометрическое звено.



Рисунок 3.3 – Установка торцевых токосъемников на АМН.



Рисунок 3.4 – Установка тягового тензометрического звена на АМН.

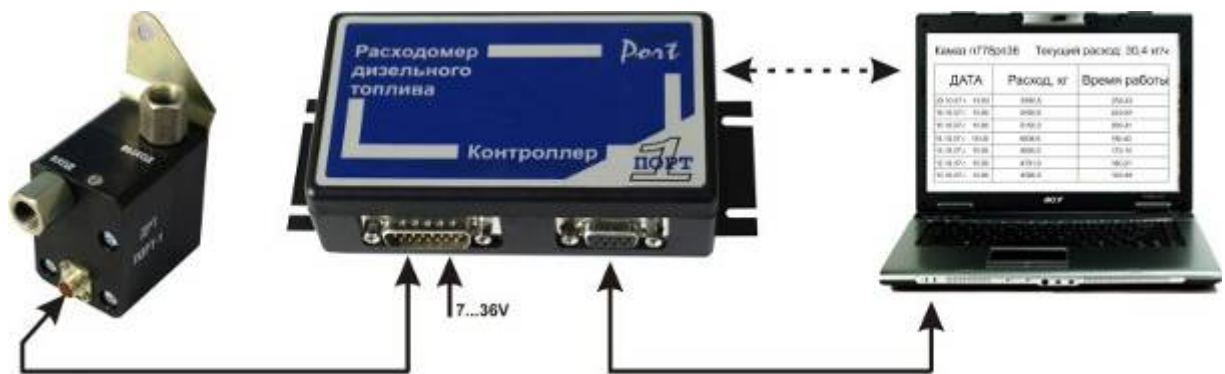


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема расходомера топлива «Порт-1» и его установка на испытуемый образец АМН (КАМАЗ-5350).



Рисунок 3.6 – Установка тензометрических датчиков на полуось АМН.

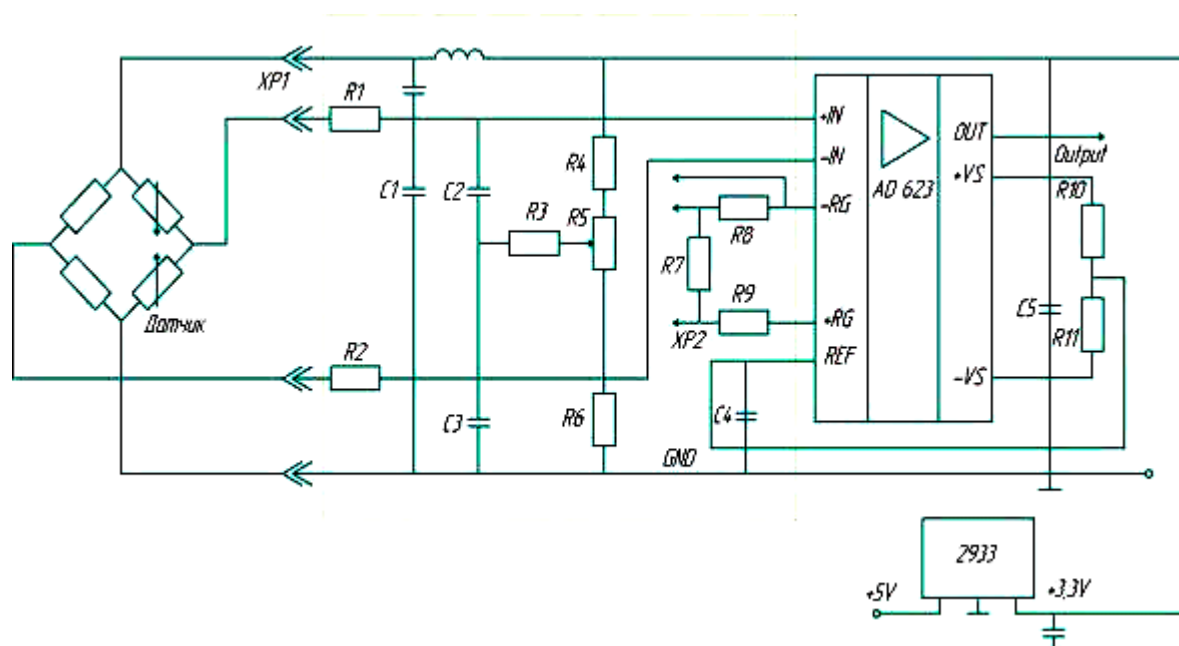


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема подключения усилителя к тензометрическому датчику.

Для усиления сигналов тензометрических датчиков применялся усилитель Analog Devices 623.

Оценка топливной экономичности проводилась при проведении заездов АМН по участкам местности при движении по ДОП с различными типами грунтов в районе поселка Черемушки Омской области и в пойме реки Иртыш. Сравнительный анализ проводился по результатам, полученным при движении АМН с давлением воздуха в шинах, рекомендуемым заводом-изготовителем и по предлагаемому способу децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах.

С использованием расходомера дизельного топлива «ПОРТ-1» (рисунок 3.5)

производился замер израсходованного при проведении испытаний дизельного топлива. При проведении испытаний использовались основные марки топлив дизельных марок Л-0,2-40 ГОСТ 305-82 и З-0,2 ГОСТ 305-82, соответствующие предъявляемым требованиям без содержания в своем составе водорастворимых кислот, щелочей, воды и механических примесей.



Рисунок 3.8 – Индукционный датчик токосъемника.

С использованием блока регистрирующей аппаратуры (рисунок 3.9), многоканального АЦП с мультиплексированием каналов L-Card E14-140 проводилась регистрация исследуемых параметров, передача которых осуществлялась цифровым сигналом в ноутбук для воспроизведения в программной среде PowerGraph (фрагмент регистрируемых данных представлен на рисунке 3.10).

Электропитание измерительно-регистрирующего комплекса производилось от двух аккумуляторных батарей 6СТ-190ТРМ, соединенных последовательно и через USB-порт ноутбука.

Предельная временная погрешность при регистрации параметров не превышала плюс 0,2 %. Максимальная относительная погрешность, вносимая в блок регистрирующей аппаратуры, была принята плюс 0,2 %, что соответствовало тех-

ническим характеристиками и паспортными данными.

С целью выбора масштаба записи регистрируемых параметров движения испытуемого образца АМН перед началом зачетных испытаний проводились пробные заезды.



Рисунок 3.9 – Блок регистрирующей аппаратуры.

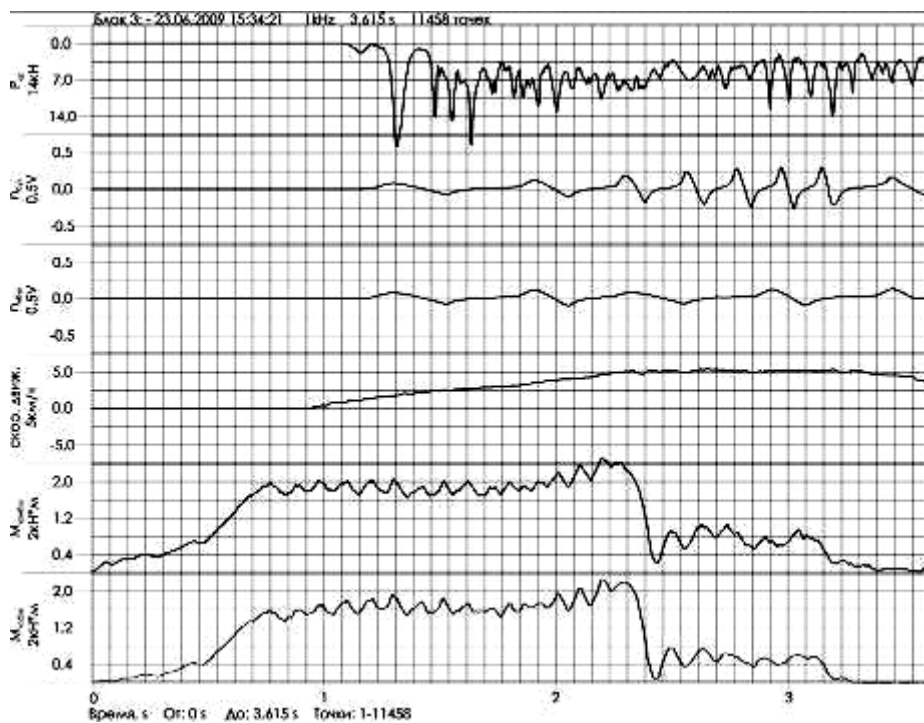


Рисунок 3.10 – Фрагмент регистрации данных в ПО PowerGraph.

3.2 Порядок и условия проведения экспериментального исследования

В соответствии с определенными задачами исследования методика предполагала проведение испытаний образца АМН в штатной комплектации при движении с различной нагрузкой на колеса переднего моста и задней тележки по различным грунтовым поверхностям с деформируемым основанием и изменением давления воздуха в шинах в соответствии с рекомендациями инструкции по эксплуатации автомобиля и нормативно-технической документацией. Общие условия испытаний соответствовали требованиям РТМ 37.001.053–2000 и РД 37.05.344–2006. Методика проведения экспериментальных исследований выработывалась с учетом выполнения требований и рекомендаций [3, 32, 79].

Испытания проводились в три этапа.

На первом этапе определялись кинематические и силовые характеристики колес, а также параметры их взаимодействия с опорной поверхностью. На втором – определялся расход топлива по соответствующему типу ДОП. На третьем этапе определялась возможность максимальной силы тяги на крюке АМН.

Экспериментальные исследования проводились в условиях, часто встречающихся в реальных условиях эксплуатации АМН при движении по ДОП с различными типами грунтов в районе поселка Черемушки Омской области и в пойме реки Иртыш. Участки местности, исходя из возможностей, были выбраны с максимально однородным по характеристикам типом грунта:

- участок суглинистого грунта с влажностью около 20 %;
- участок суглинистого грунта с влажностью около 35 %;
- участок влажного речного песка влажностью около 30 %;
- участок свежевспаханного суглинка с влажностью около 35 %.

Длина зачетного участка составляла 250 м, длина дополнительного (разгонного) участка – 50 м. Фрагменты проведения экспериментальных исследований представлены на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Фрагменты проведения экспериментальных исследований.

Прицепным звеном, соединенным с испытываемым образцом АМН с использованием тензометрического звена, создавалась сила тяги на крюке. За счет увеличения массы прицепного звена производилось увеличение силы тяги.

В ходе первого этапа экспериментального исследования производилось определение силовых и геометрических параметров колес испытываемого АМН (масса колеса, коэффициент тангенциальной эластичности, радиус качения в свободном режиме, момент инерции) и параметров, характеризующих взаимодействие с опорной поверхностью (коэффициенты сцепления с опорной поверхностью и сопротивления качению).

При равномерном движении испытываемого образца АМН на горизонтальном участке ровной опорной поверхности при фиксированной подаче топлива производилось измерение радиуса колес в свободном режиме. В ходе испытания датчиком токосъемника фиксировалось число оборотов колеса n , а измерительным узлом типа «пятое колесо» производилась регистрация пройденного АМН пути S . Из выражения (3.1) определялся радиус качения:

$$r_k = \frac{S}{2\pi n}. \quad (3.1)$$

Далее определялись значения радиуса качения при различных крутящих моментах, подводимых к колесу. На основании полученных значений определялся коэффициент тангенциальной эластичности:

$$\lambda = \frac{r_{ki} - r_{kj}}{M_{kj} - M_{ki}}. \quad (3.2)$$

При равномерном движении испытываемого образца АМН по экспериментальному участку пути в ведущем режиме производилось определение сопротивления качению, при этом движение осуществлялось с минимальной скоростью.

Подводимый к ведущим колесам крутящий момент равен моменту сопротивления качению, из чего следует, что коэффициент сопротивления качению можно найти:

$$f = \frac{M_k}{r_k G}, \quad (3.3)$$

где M_k – момент, подводимый к колесу;

r_k – радиус колеса;

G – нагрузка на колесе.

Максимальный коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью определялся:

$$\varphi = \frac{M_k}{r_k G} - f. \quad (3.4)$$

При прохождении испытываемым образцом АМН зачетного участка производилась фиксация параметров:

- пройденного пути;
- расхода топлива;
- времени прохождения зачетного участка;
- среднего значения силы тяги на крюке;
- крутящего момента на ведущих колесах;
- частоты вращения ведущих колес.

Для достоверности экспериментального исследования необходимо было определить минимальное количество заездов. Для достижения этой цели было проведено предварительное экспериментальное исследование, включающее семь измерений регистрируемых параметров.

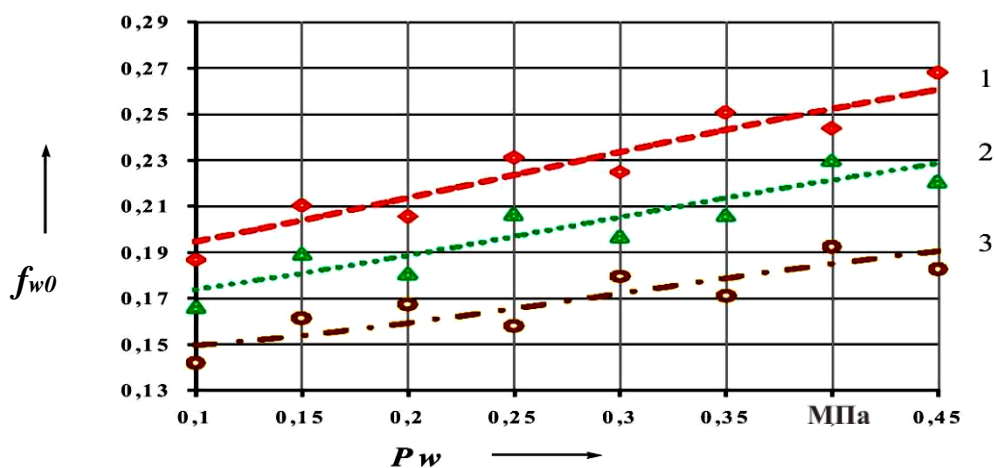
3.3 Оценка адекватности математической модели

При проведении экспериментальных исследований производилось определение показателей взаимодействия колес испытуемого образца АМН с грунтовым основанием опорной поверхности – коэффициента сопротивления качению и коэффициента сцепления. Значения коэффициентов сцепления не являются постоянными величинами и варьируются в определенном интервале значений, что, естественно, объясняется изменением физико-механических свойств грунтового основания опорной поверхности по мере увеличения количества проходов.

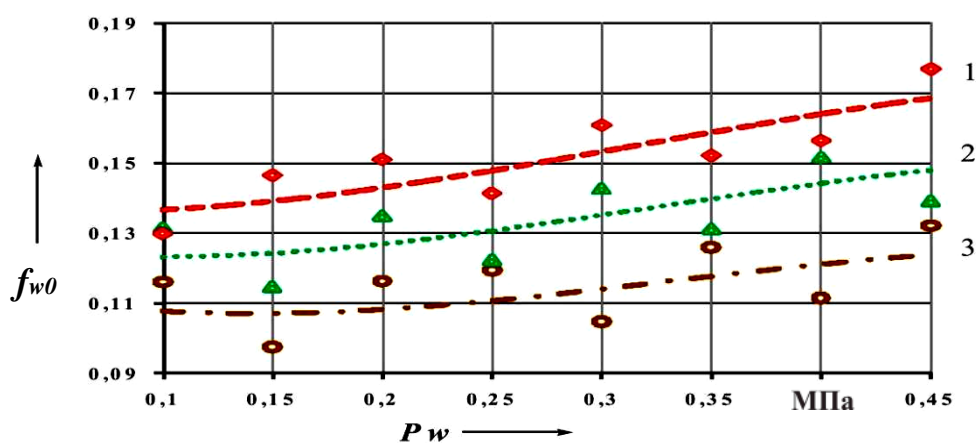
Оценка адекватности математической модели производилась при осуществлении движения испытуемого образца АМН на скоростях до 20 км/ч на пониженной передаче с различной нагрузкой на крюке АМН, различной загруженностью АМН (различной нагрузкой на колеса каждой оси), с варьированием давления воздуха в шинах от минимального до номинального (в соответствии с характеристиками используемых на АМН шин) с использованием штатной централизованной СРДВШ. Использовались экспериментальные данные параметров движения АМН КАМАЗ-5350 в серийной комплектации.

Для проведения сравнительной оценки экспериментальных и теоретических данных в качестве параметров выбраны функциональные зависимости коэффициента сопротивления качению от нагрузки, приходящейся на колеса каждой оси АМН, установленного давления воздуха в шинах колес и номера прохода колеса по колее (т.е. расположения колеса в колесной формуле автомобиля) (рисунки 3.12–3.19).

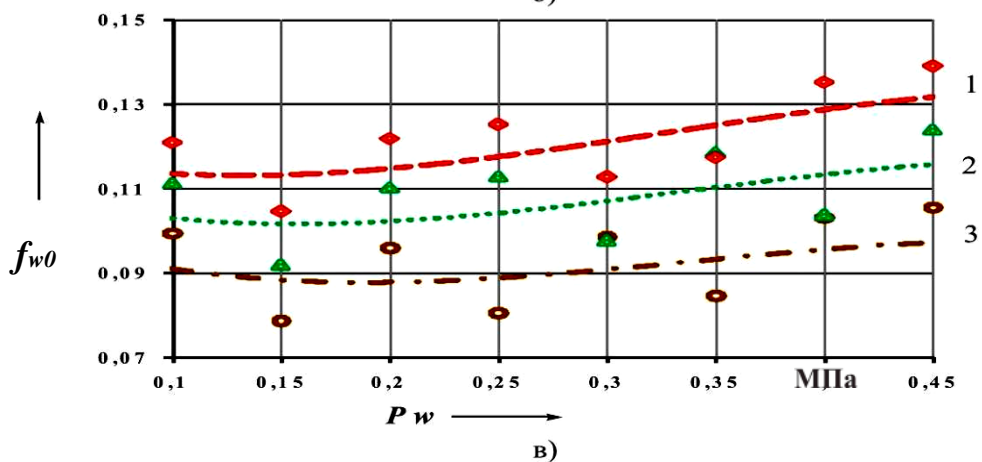
Проведенный анализ полученных зависимостей, представленных на рисунках 3.12–3.19, позволяет сделать вывод, что зависимости, полученные по результатам моделирования движения испытанного образца АМН, находятся в пределах доверительного интервала и вполне соответствуют характеру кривых изменения коэффициента сопротивления качения колеса в функции от нагрузки и давления воздуха в шине, полученных по результатам экспериментальных исследований. При этом погрешность моделирования движения испытанного образца АМН не превышает 8,5 %, а в целом по совокупности параметров находится в пределах от 7,3 % до 11,2 %. Статистическая оценка была выполнена для всех параметров, зарегистрированных в ходе экспериментальных исследований на всех режимах движения испытанного образца АМН.



а)



б)

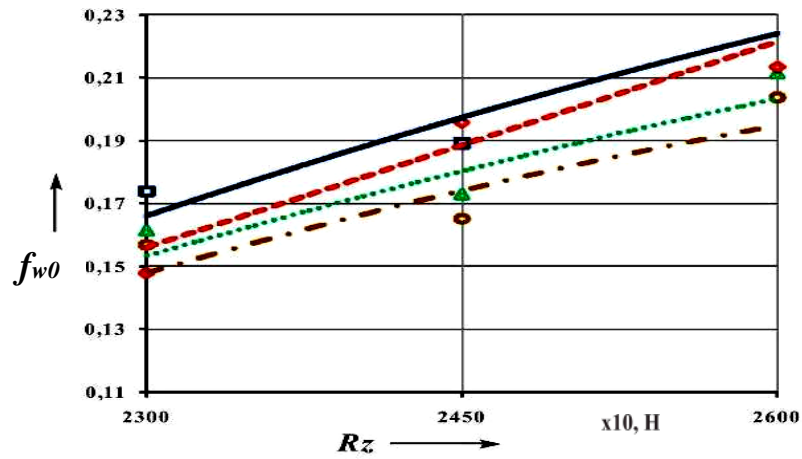


в)

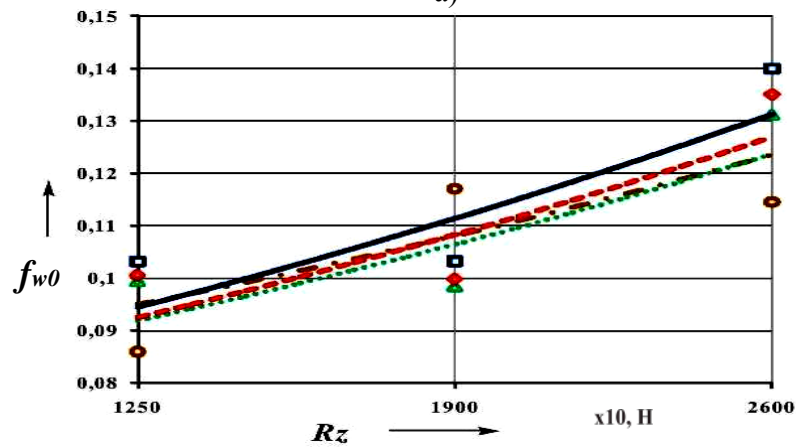
эксперимент
 расчет

а – колеса первой оси (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н; 2 – 24500 Н; 3 – 23000 Н);
 б – первые колеса задней тележки, в – вторые колеса задней тележки (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н, 2 – 19000 Н, 3 – 12500 Н)

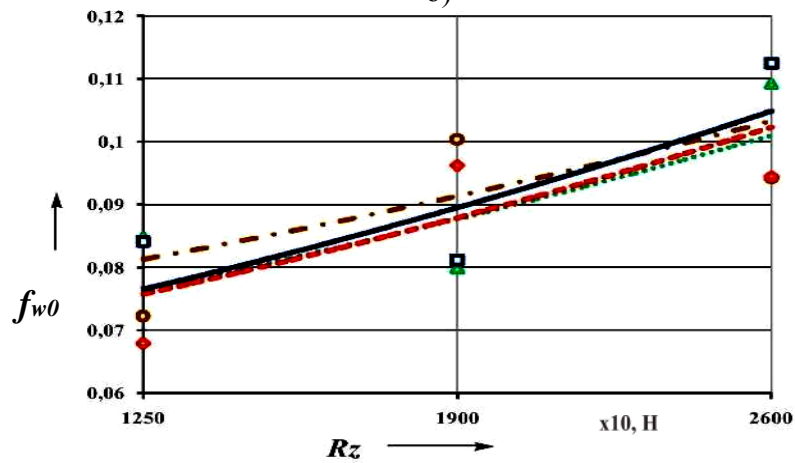
Рисунок 3.12 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от P_w при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «суглинок-20».



а)



б)



в)

— 0,10 МПа;
 — 0,15 МПа;
 — 0,20 МПа;
 — 0,25 МПа

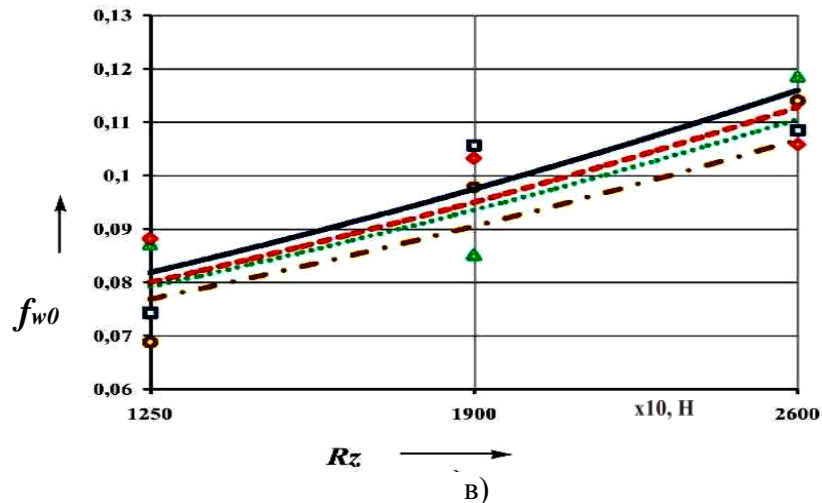
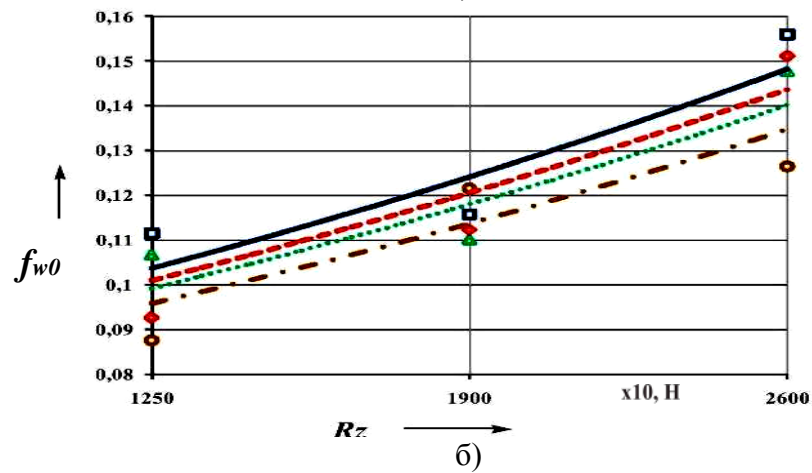
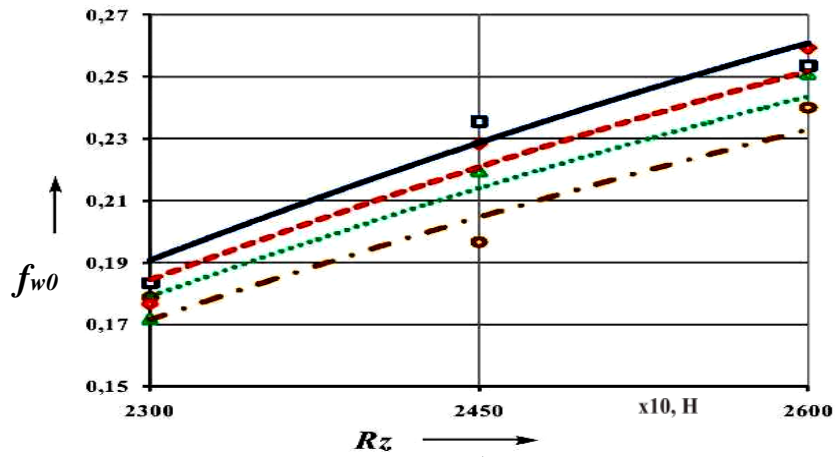
○

эксперимент

рассчет

а – колеса первой оси; б – первые колеса задней тележки; в – вторые колеса задней тележки

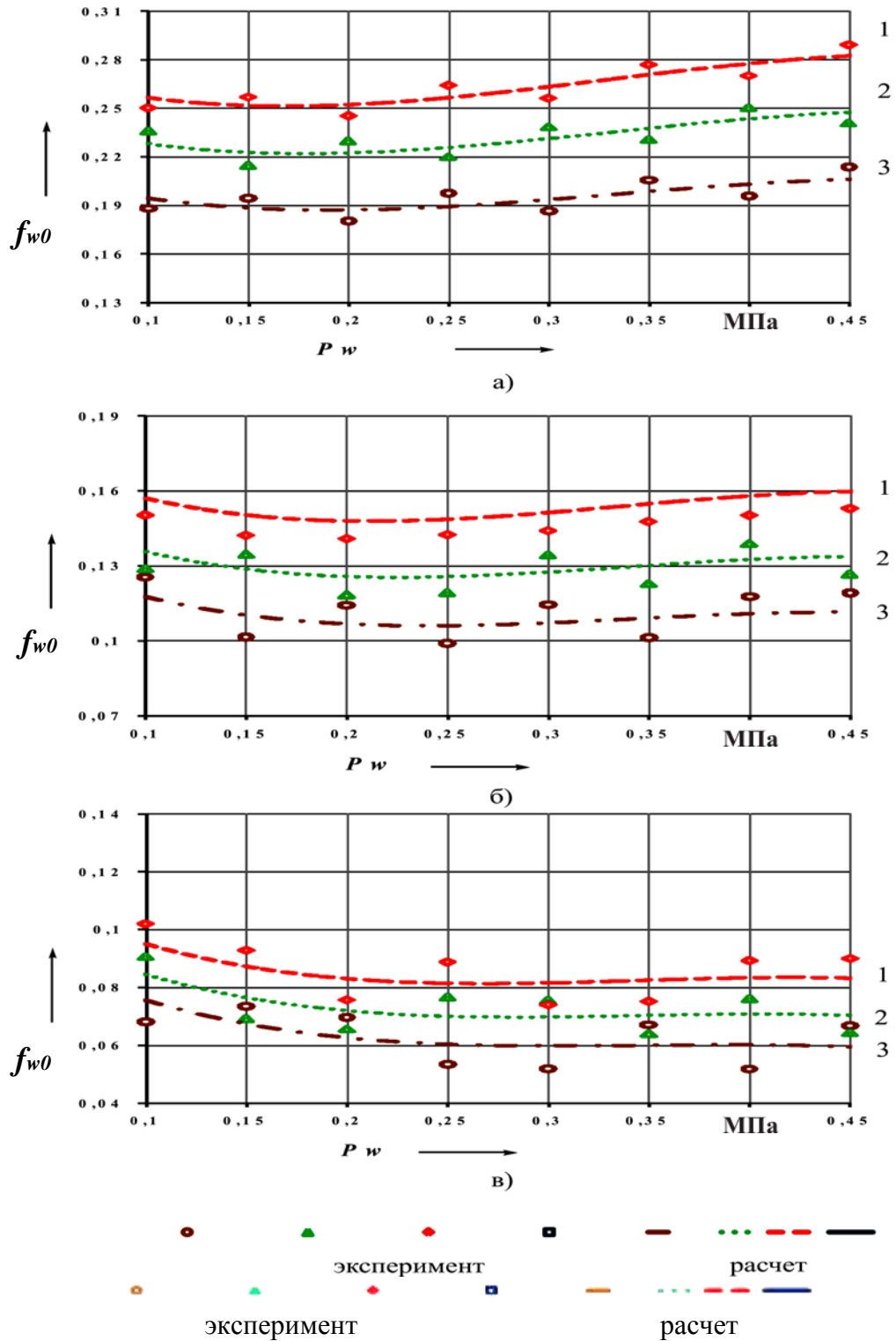
Рисунок 3.13 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от R_z при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «суглинок-20» при изменении давления в диапазоне от 0,10 до 0,25 МПа.



● — 0,30 МПа; ▲ — 0,35 МПа; ◆ — 0,40 МПа; ■ — 0,45 МПа
 ○ — эксперимент □ — расчет

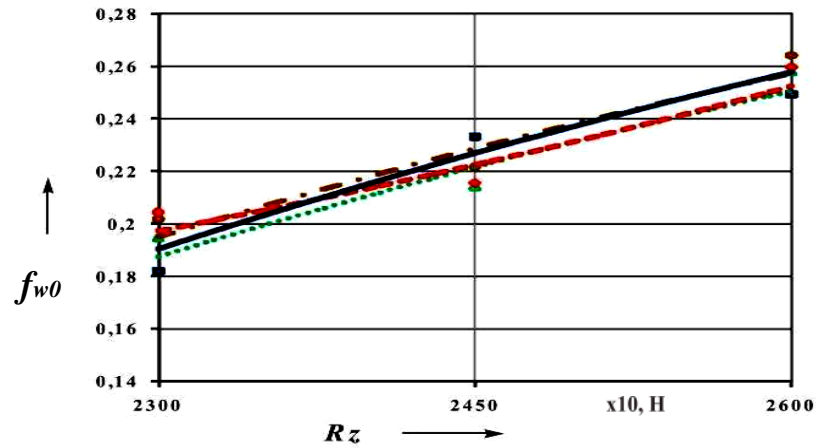
а – колеса первой оси; б – первые колеса задней тележки; в – вторые колеса задней тележки

Рисунок 3.14 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от Rz при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «суглинок-20» при изменении давления в диапазоне от 0,30 до 0,45 МПа.

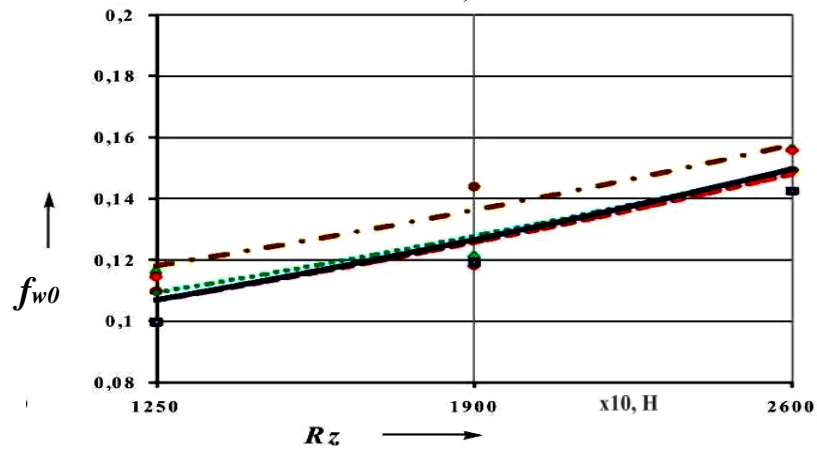


а – колеса первой оси (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н; 2 – 24500 Н; 3 – 23000 Н);
 б – первые колеса задней тележки, в – вторые колеса задней тележки (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н, 2 – 19000 Н, 3 – 12500 Н)

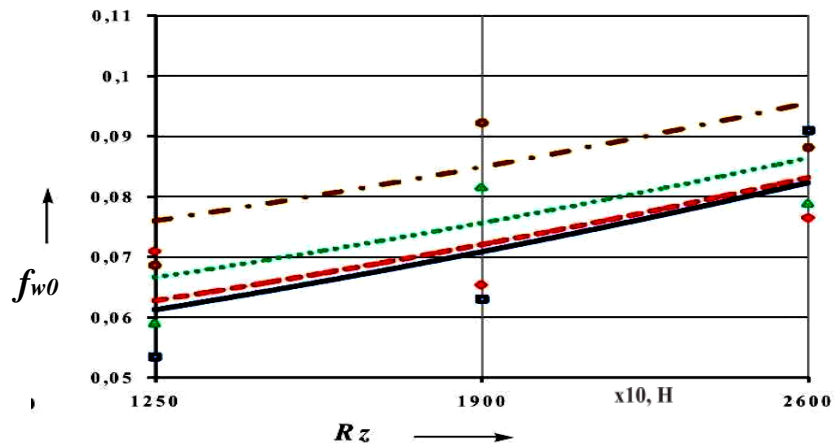
Рисунок 3.15 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от P_w при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «суглинок-35».



а)



б)

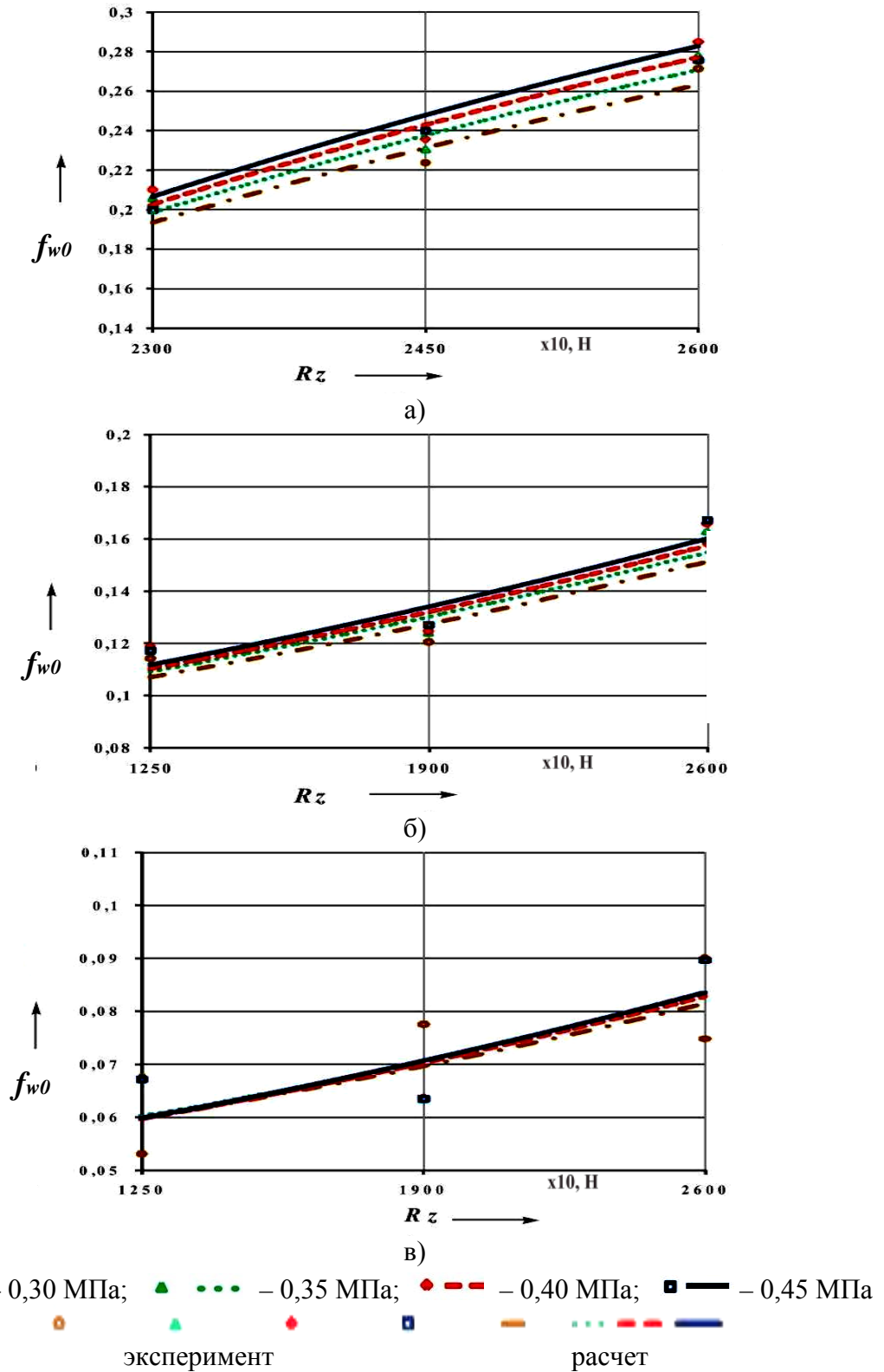


в)

● — 0,10 МПа; ▲ — 0,15 МПа; ◆ — 0,20 МПа; ■ — 0,25 МПа
 ○ — эксперимент □ — расчет

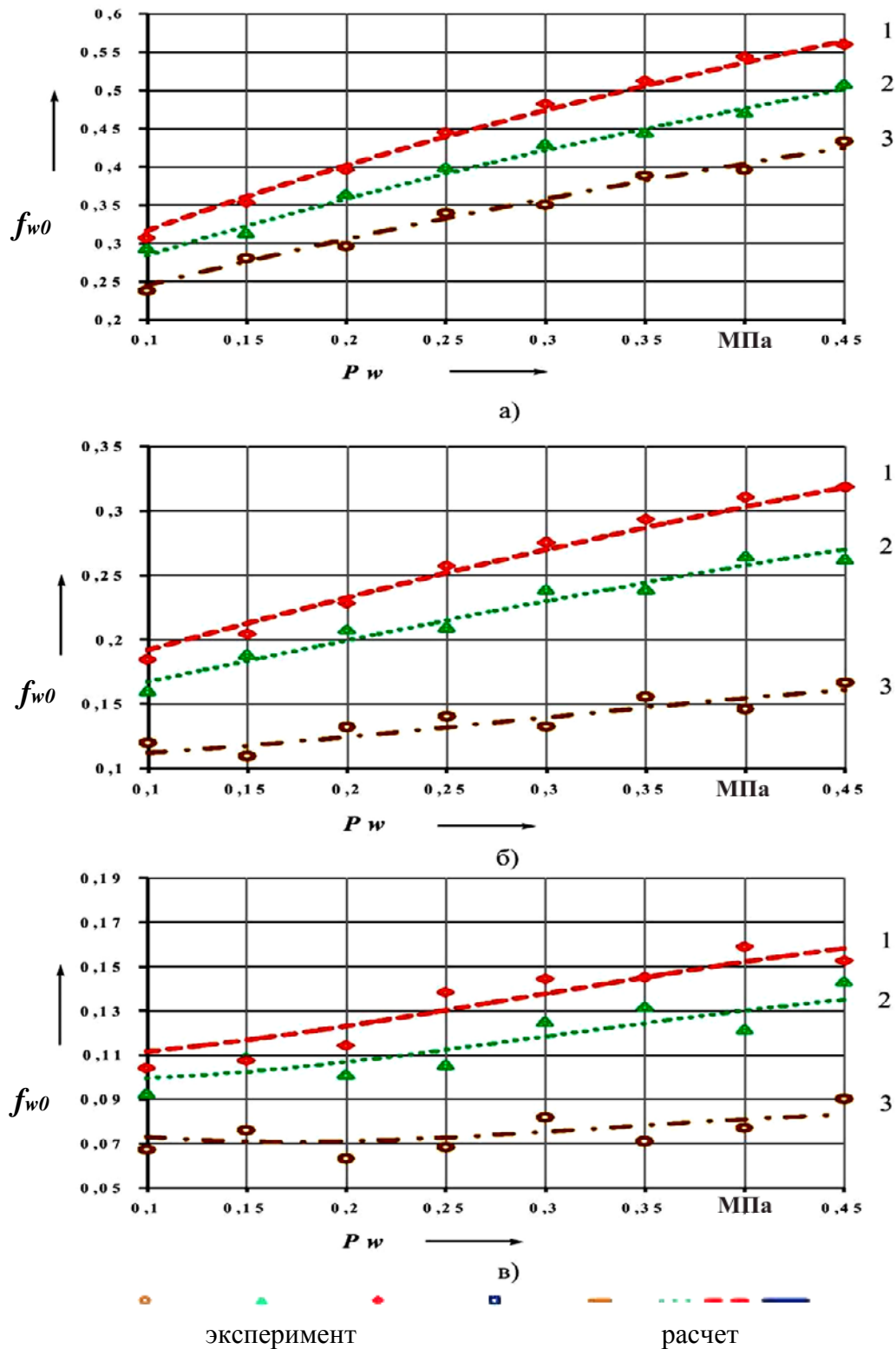
а – колеса первой оси; б – первые колеса задней тележки; в – вторые колеса задней тележки

Рисунок 3.16 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от R_z при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «суглинок-35» при изменении давления в диапазоне от 0,10 до 0,25 МПа.



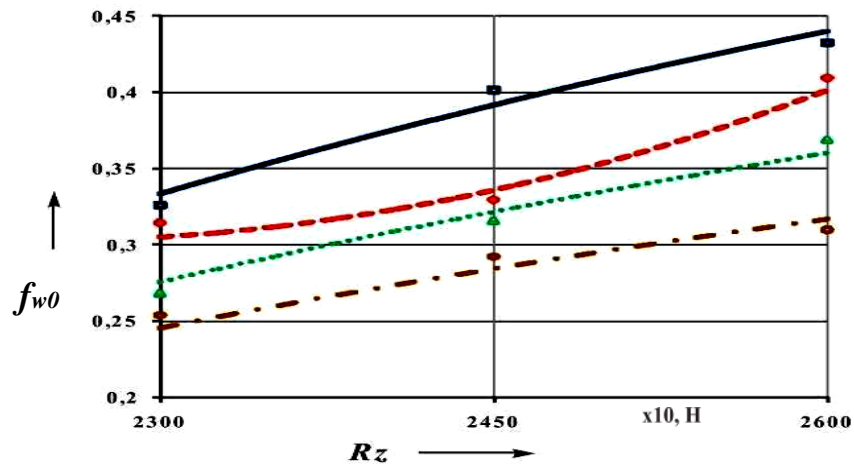
а – колеса первой оси; б – первые колеса задней тележки; в – вторые колеса задней тележки

Рисунок 3.17 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от R_z при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «суглинок-35» при изменении давления в диапазоне от 0,30 до 0,45 МПа.

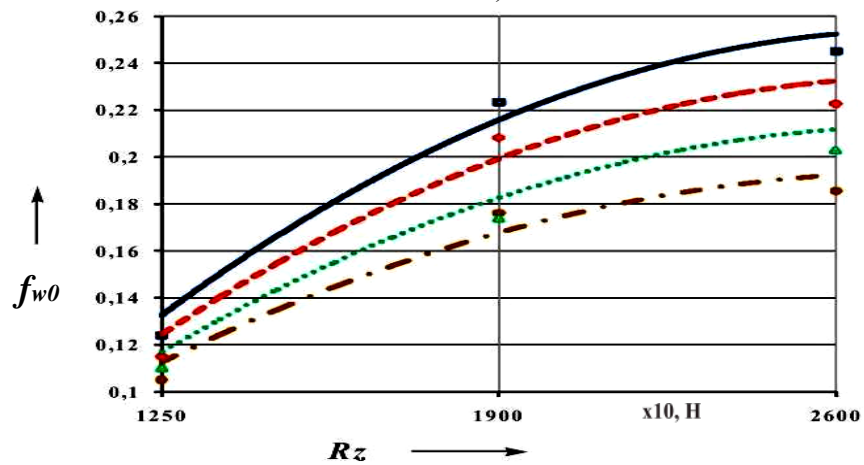


а – колеса первой оси (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н; 2 – 24500 Н; 3 – 23000 Н);
 б – первые колеса задней тележки, в – вторые колеса задней тележки (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н, 2 – 19000 Н, 3 – 12500 Н)

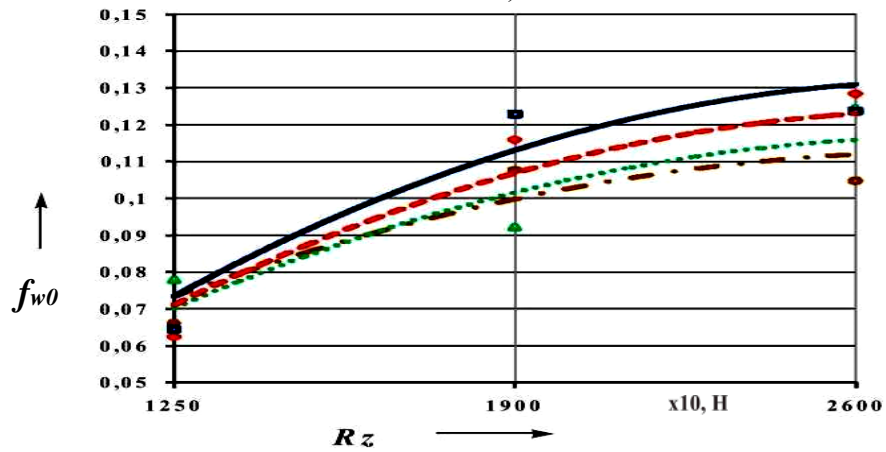
Рисунок 3.18 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от P_w при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «пашня».



а)



б)



в)

● — 0,10 МПа; ▲ — 0,15 МПа; ◆ — 0,20 МПа; ■ — 0,25 МПа



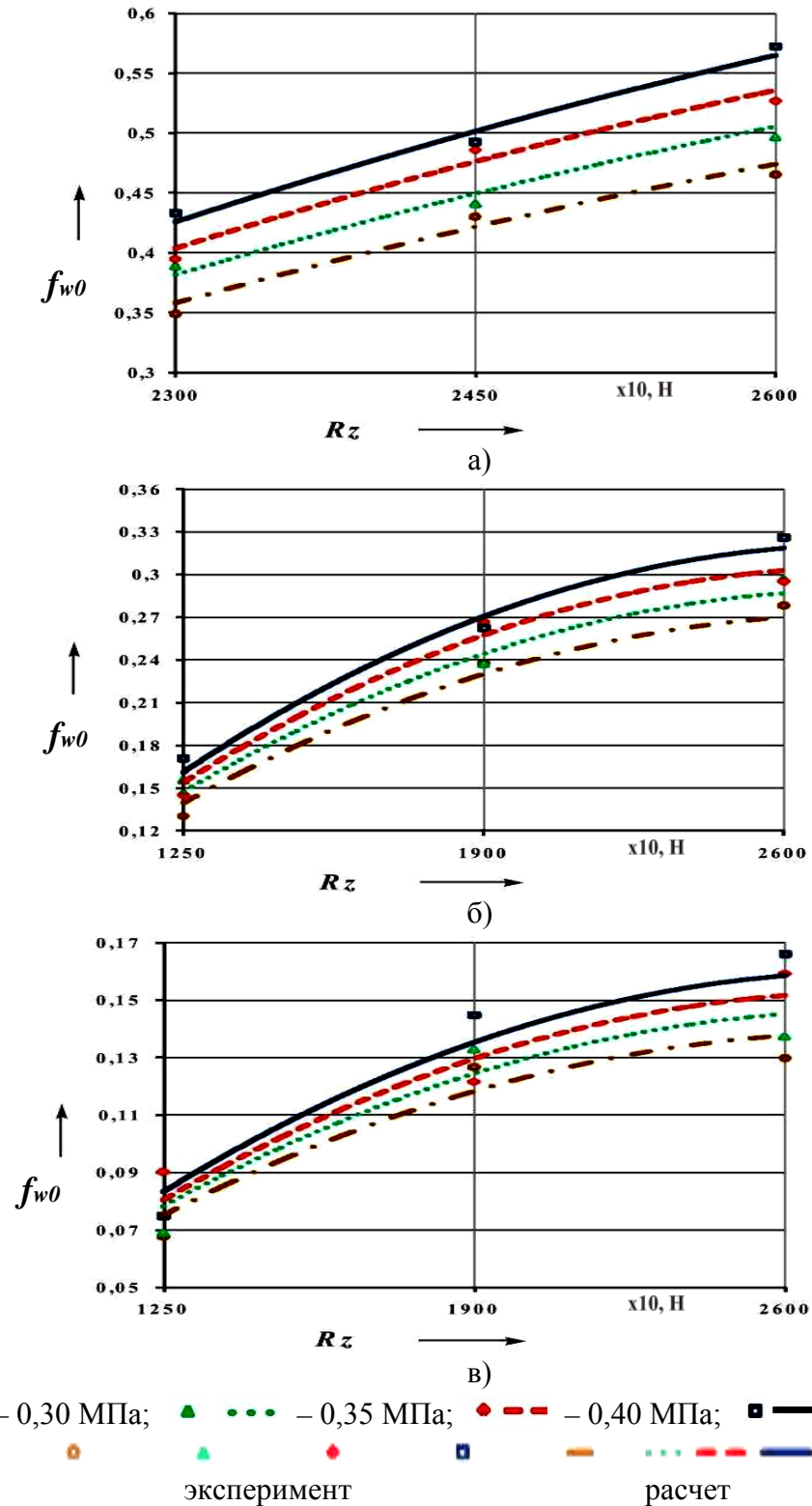
эксперимент



расчет

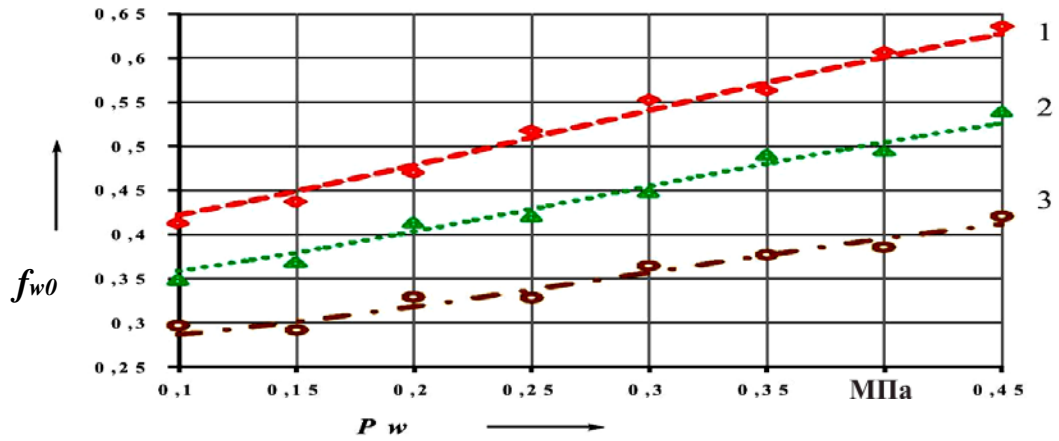
а – колеса первой оси; б – первые колеса задней тележки; в – вторые колеса задней тележки

Рисунок 3.19 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от R_z при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «пашня» при изменении давления в диапазоне от 0,10 до 0,25 МПа.

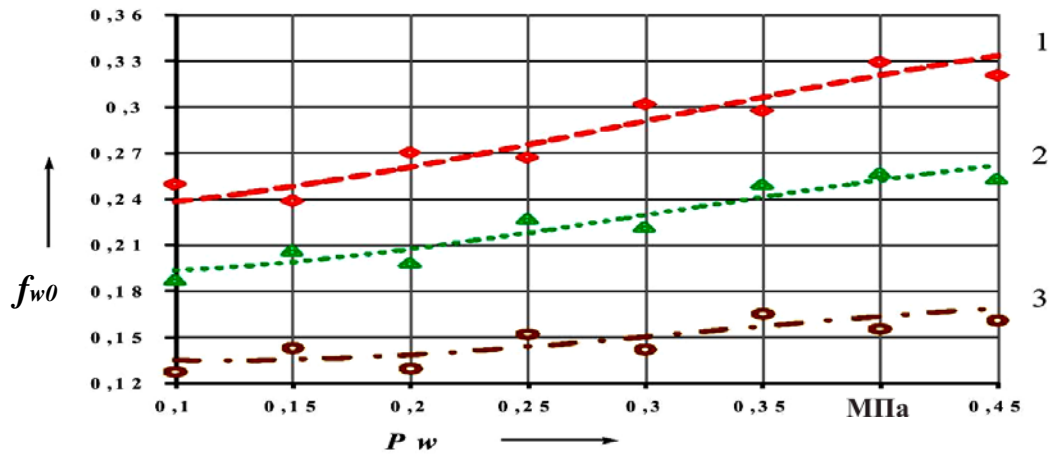


а – колеса первой оси; б – первые колеса задней тележки; в – вторые колеса задней тележки

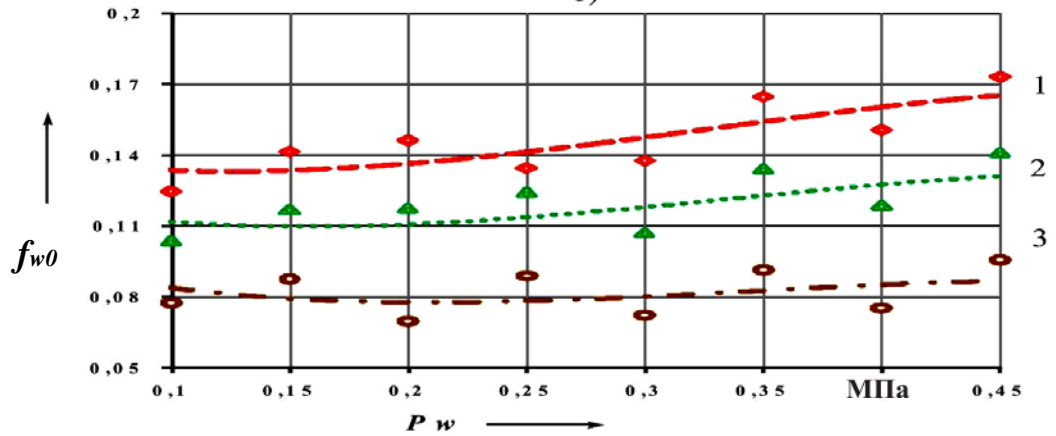
Рисунок 3.20 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от R_z при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «пашня» при изменении давления в диапазоне от 0,30 до 0,45 МПа.



а)



б)

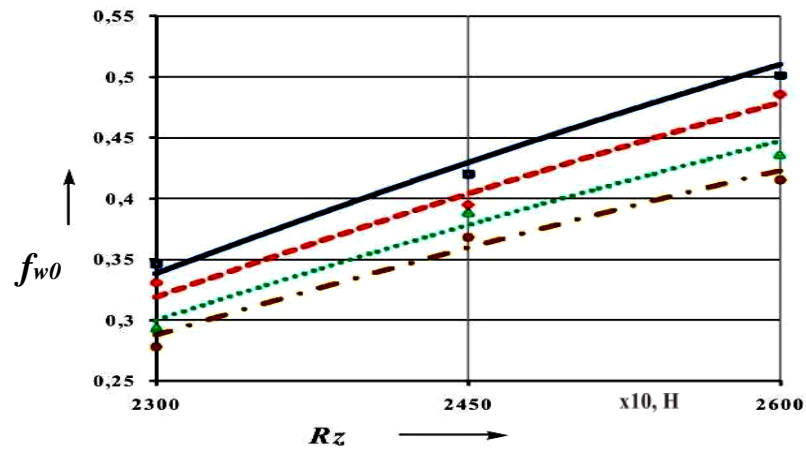


в)

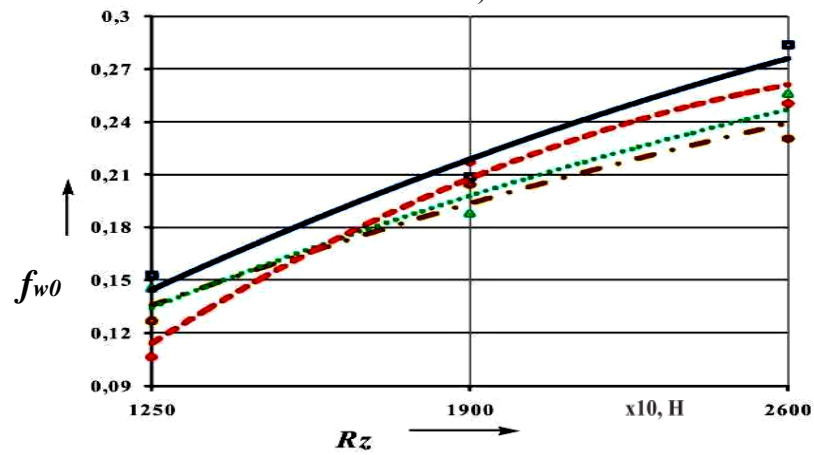
○ ▲ ◆ ■ эксперимент расчет

а – колеса первой оси (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н; 2 – 24500 Н; 3 – 23000 Н);
 б – первые колеса задней тележки, в – вторые колеса задней тележки (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н, 2 – 19000 Н, 3 – 12500 Н)

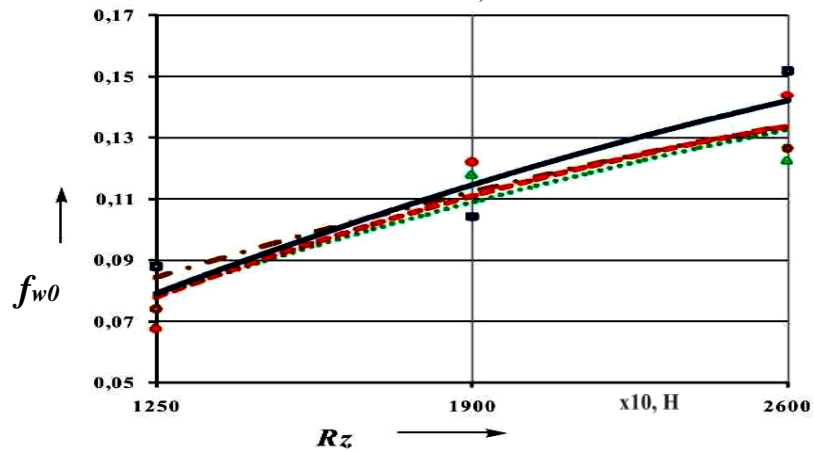
Рисунок 3.21 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от P_w при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «мокрый песок».



а)



б)

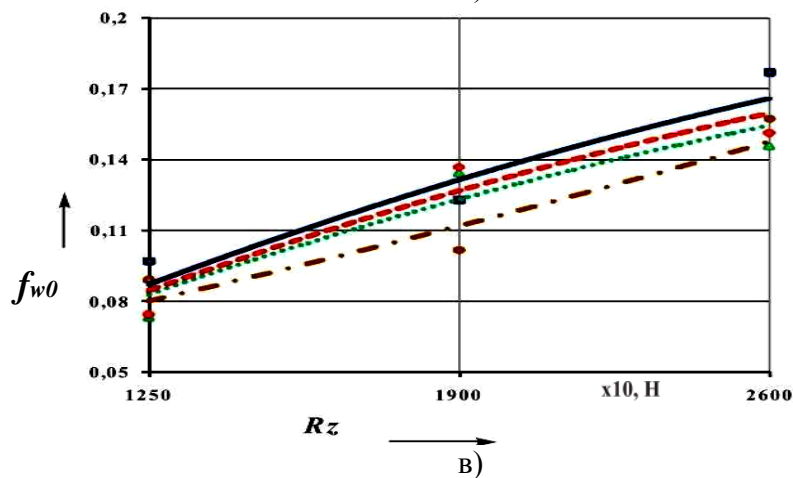
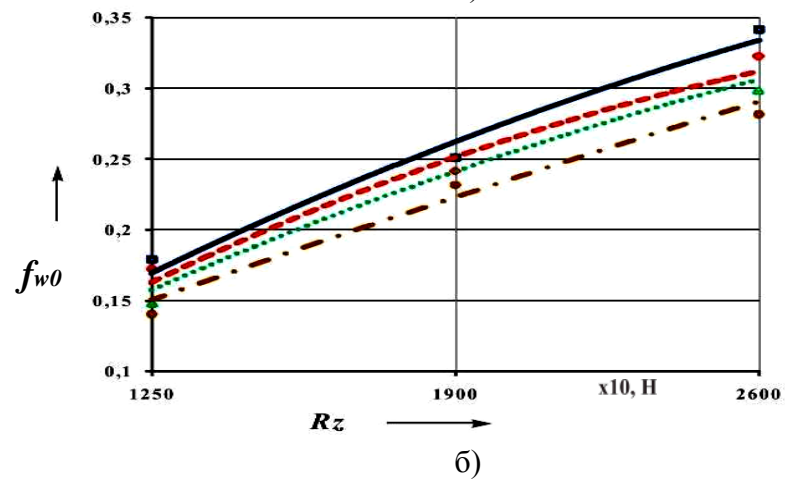
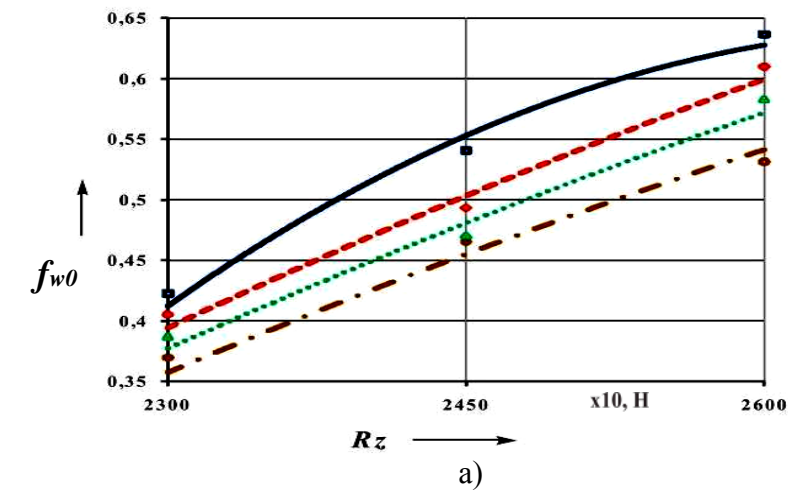


в)



а – колеса первой оси; б – первые колеса задней тележки; в – вторые колеса задней тележки

Рисунок 3.22 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от Rz при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «мокрый песок» при изменении давления в диапазоне от 0,10 до 0,25 МПа.



● — 0,30 МПа; ▲ — 0,35 МПа; ◆ — 0,40 МПа; ■ — 0,45 МПа
 ○ — эксперимент □ — расчет

а – колеса первой оси; б – первые колеса задней тележки; в – вторые колеса задней тележки

Рисунок 3.23 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости f_{w0} от Rz при движении АМН по ДОП с грунтовым основанием «мокрый песок» при изменении давления в диапазоне от 0,30 до 0,45 МПа.

3.4 Выводы

1. Выбранная методика и разработанный измерительно-регистрирующий комплекс позволили провести натурное экспериментальное исследование движения АМН по деформируемой опорной поверхности с варьированием нагрузки и давления воздуха в шинах колес каждой оси в зависимости от их расположения в колесной формуле.

2. Математическое моделирование движения АМН и результаты проведенного экспериментального исследования с доверительной вероятностью 0,95 в полной мере описывают исследуемые процессы. Погрешность модели для различных параметров не превышает 12 %, что вполне удовлетворительно для инженерных расчетов.

4 ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ПРОХОДИМОСТИ

4.1 Обоснование децентрализации регулирования давления воздуха в шинах

Проведенными исследованиями установлено, что характер движения КТС по ДОП определяется множеством факторов, как конструктивными и эксплуатационными, так и типом грунта.

Следствием движения АМН по ДОП является то, что происходит естественное изменение характеристик опорной поверхности (уплотнение, разрушение грунта и т.д.) при проходе каждого последующего колеса КД. При этом колеса каждой последующей оси могут двигаться по колее, проложенной предыдущим колесом, частично по целинной опорной поверхности и по еще не деформированному грунту. Конструкция АМН, как правило, предусматривает равную ширину колеи для колес всех осей, что обуславливает качение каждого колеса вслед предыдущему.

Как отмечалось в работах многих авторов, анализ которых проведен в первой главе, при последовательном проходе колес идет приращение глубины колеи, вызывающее увеличение сил трения в зависимости от типа грунта и его характеристик и увеличение мощностных потерь на преодоление этого сопротивления. На ДОП с основой из уплотняемого грунта сопротивление качению передних колес больше, чем последующих.

Использование СРДВШ на АМН позволяет уменьшить глубину колеи и сопротивление качению колес. В то же время величина оптимального давления воздуха в шинах зависит от нагрузки, приходящейся на колеса, от развесовки АМН и типа ДОП, по которой совершается движение.

Разработанная в данном исследовании математическая модель движения АМН по ДОП при известных нагрузочных и размерных параметрах, показателях жесткостных характеристик, а также механических параметрах грунта позволила

провести расчетный эксперимент параметров этого качения в функции от нагрузки, приходящейся на колеса, установленного давления воздуха в шинах и номера прохода (или каждого колеса, катящегося вслед предыдущему).

На основе разработанной математической модели с использованием системы Matlab в пакете Simulink проведен расчет влияния давления воздуха в шинах (P_w) на сопротивление качению колес (f_{w0}) при последовательных проходах и различных вертикальных нагрузках (R_z).

При реализации математической модели движения АМН по ДОП были приняты ограничения и допущения:

- типы грунтовых оснований – суглинистый грунт различной степени влажности (20 % и 35 %), влажный речной песок, свежевспаханный суглинок;
- в качестве исходных значений показателя c , характеризующего начальное сопротивление грунта вдавливаю и степенного показателя μ , использованы экспериментальные данные (суглинок влажностью 20 % – $c = 0,25$, $\mu = 0,77$; суглинок влажностью 35 % – $c = 0,35$, $\mu = 0,5$; влажный речной песок – $c = 0,53$, $\mu = 0,34$);
- грунт однороден, физико-механические свойства грунта не изменяются под воздействием природно-климатических факторов;
- поверхность грунтового основания однородная, горизонтальная и ровная;
- равномерное прямолинейное качение с установившейся скоростью около 7 м/с;
- увеличение ширины шины больше ширины беговой дорожки при ее прогибе по причине незначительного влияния в контакте с грунтом этого изменения на величину погружения колеса в грунтовое основание не учитывается;
- увеличение глубины образуемой колеи при появлении горизонтальных сил определяется в функции поправки на буксование колеса;
- расстояние от поверхности недеформированного грунта до глубины погружения колеса при качении соответствует глубине образуемой колеи;
- для пневматического колеса выбраны параметры и диапазон изменения давления воздуха, присущие шине модели «КАМА-1260», наиболее распространенной и применяемой на АМН экономического сектора страны и государствен-

ных структур, осуществляющих свою деятельность в интересах обороны, обеспечения законности и правопорядка;

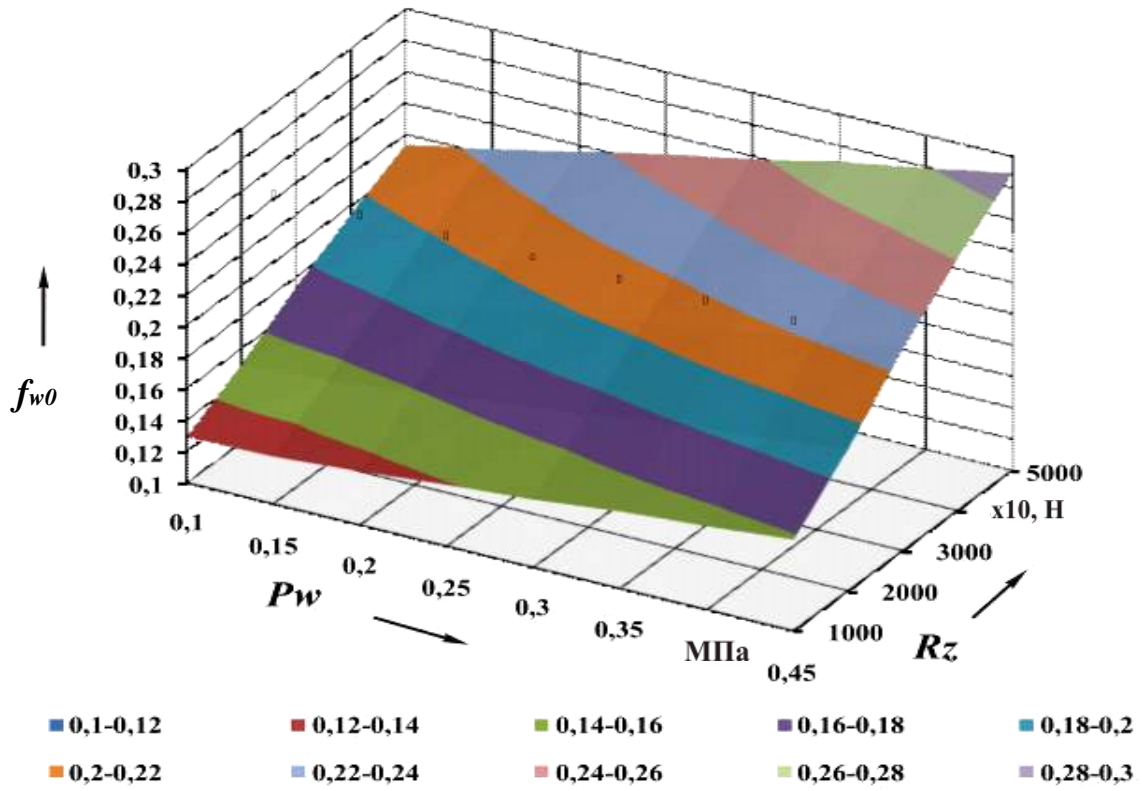
– диапазон вертикальных нагрузок на колесо и число последовательных проходов определены в соответствии с типажом применяемых АМН с грузоподъемностью от 3000 кг до 15000 кг, с колесной формулой 4x4, 6x6, 8x8.

Результаты математического моделирования движения АМН по ДОП и проведенного расчетного эксперимента с учетом выше указанных ограничений и допущений позволили получить зависимости сопротивления его качению в функции от нагрузки, приходящейся на колеса, установленного давления воздуха в шинах и номера прохода.

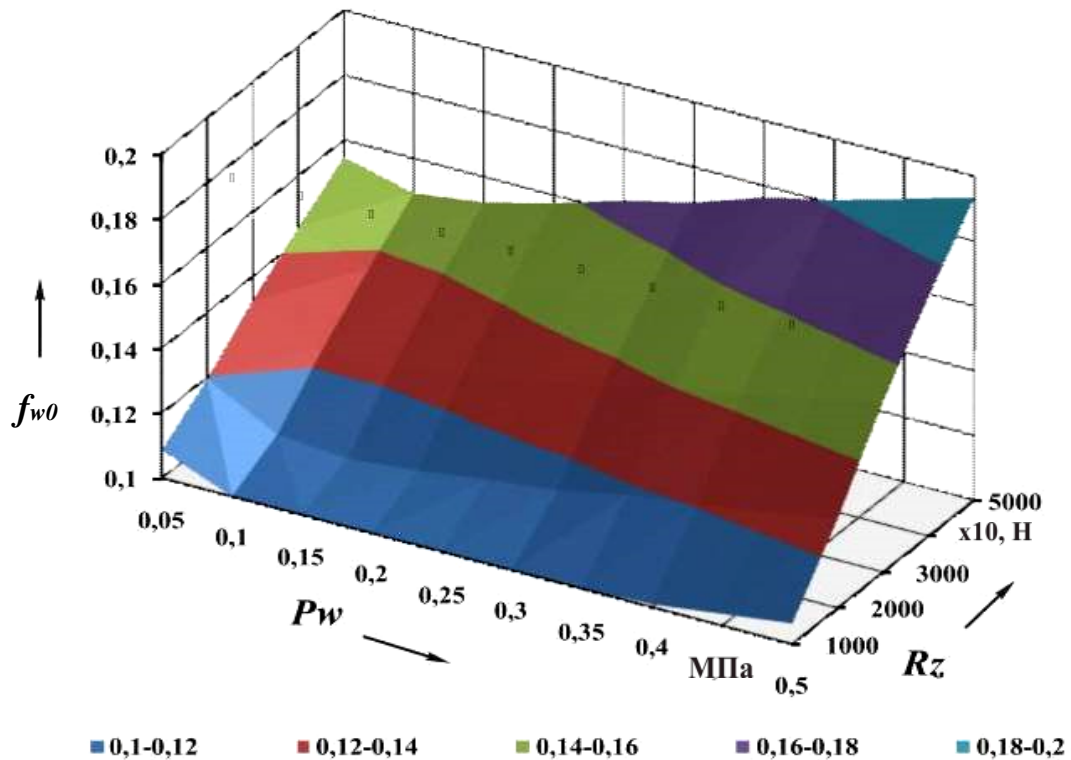
Результаты моделирования представлены на рисунках 4.1–4.8.

Анализ результатов математического моделирования позволил определить интервалы рационального давления воздуха в шинах колес, соответствующие наименьшим значениям коэффициента сопротивления качению при движении по грунтовому основанию с варьированием нагрузки, приходящейся на колеса и в зависимости от номера прохода:

– при качении колес по грунтовому основанию опорной поверхности «суглинок-20» значения рационального давления воздуха в шине при первом проходе с нагрузкой в 10000 и 20000 Н лежат в интервале от 0,10 до 0,15 МПа, в дальнейшем при увеличении нагрузки наблюдается снижение значений рационального давления до значений в интервале от 0,05 до 0,10 МПа. При втором проходе с нагрузкой в 10000 Н значения рационального давления возрастают и находятся в пределах от 0,15 до 0,20 МПа, это характерно и для третьего прохода колес с нагрузкой в интервале от 10000 до 30000 Н. С увеличением нагрузки до 20000 Н при втором проходе колес по грунтовому основанию значения рационального давления снижаются до 0,10–0,15 МПа и остаются неизменными с дальнейшим ее увеличением, эти же значения являются рациональными для третьего прохода с нагрузкой в 40000 и 50000 Н. Для четвертого прохода колес с нагрузкой в 10000 и 20000 Н значения рационального давления воздуха в шинах лежат в интервале

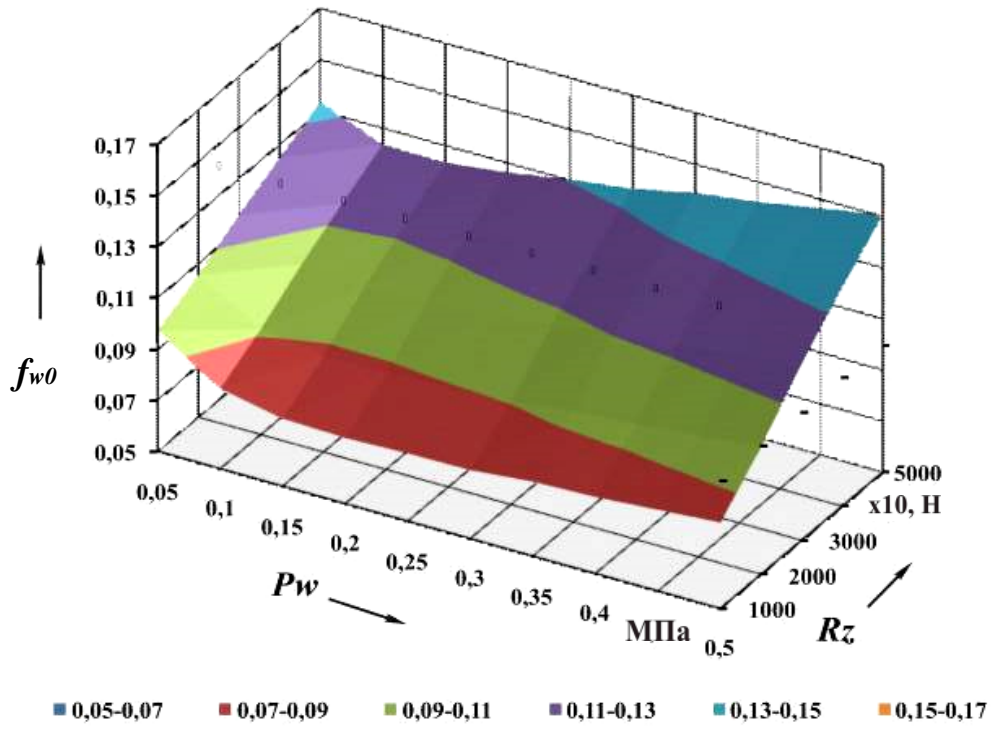


a)

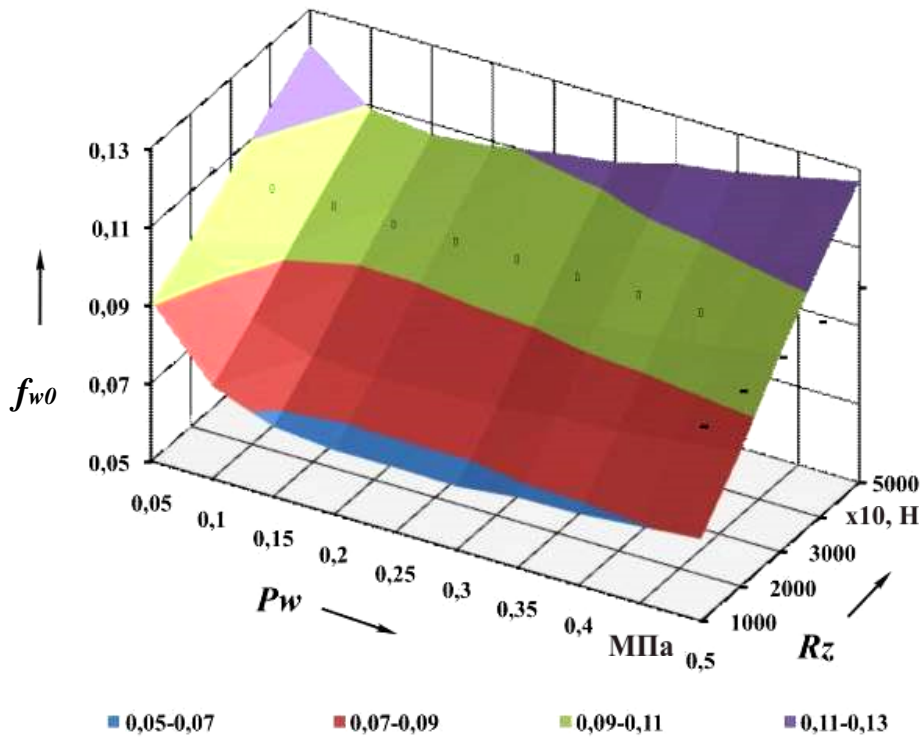


б)

Рисунок 4.1 – Зависимости f_{w0} в функции от R_z и P_w при первом (а) и втором (б) проходе колеса по грунтовому основанию ДОП «суглинок-20».

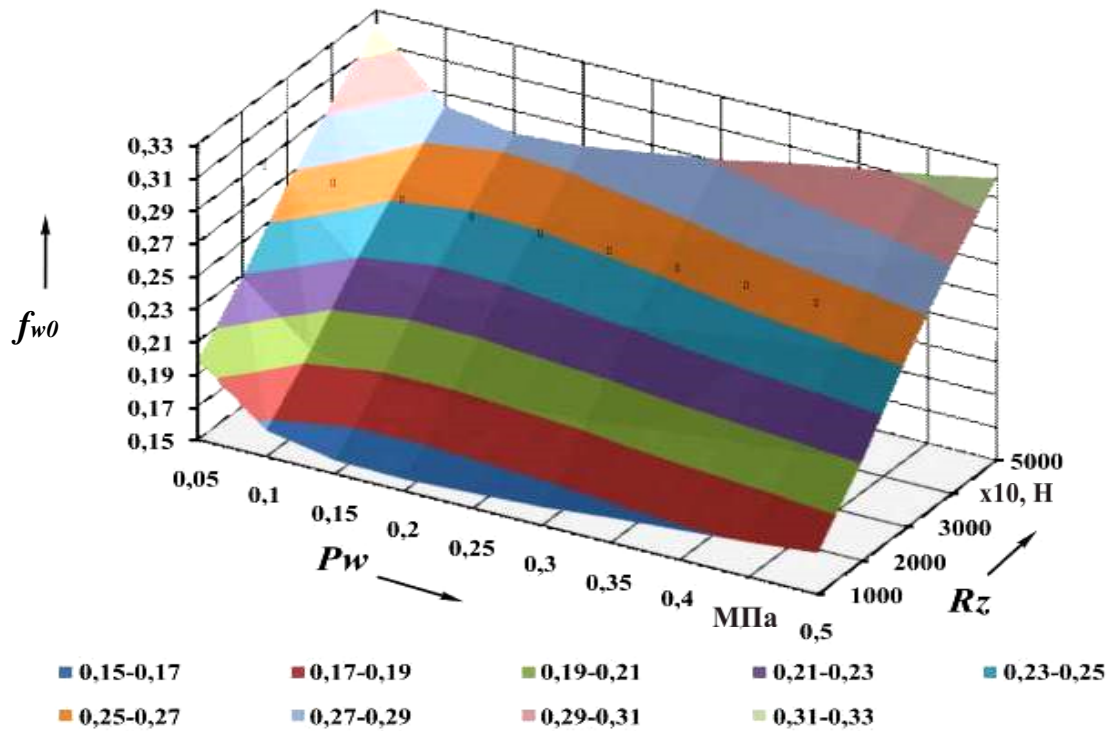


а)

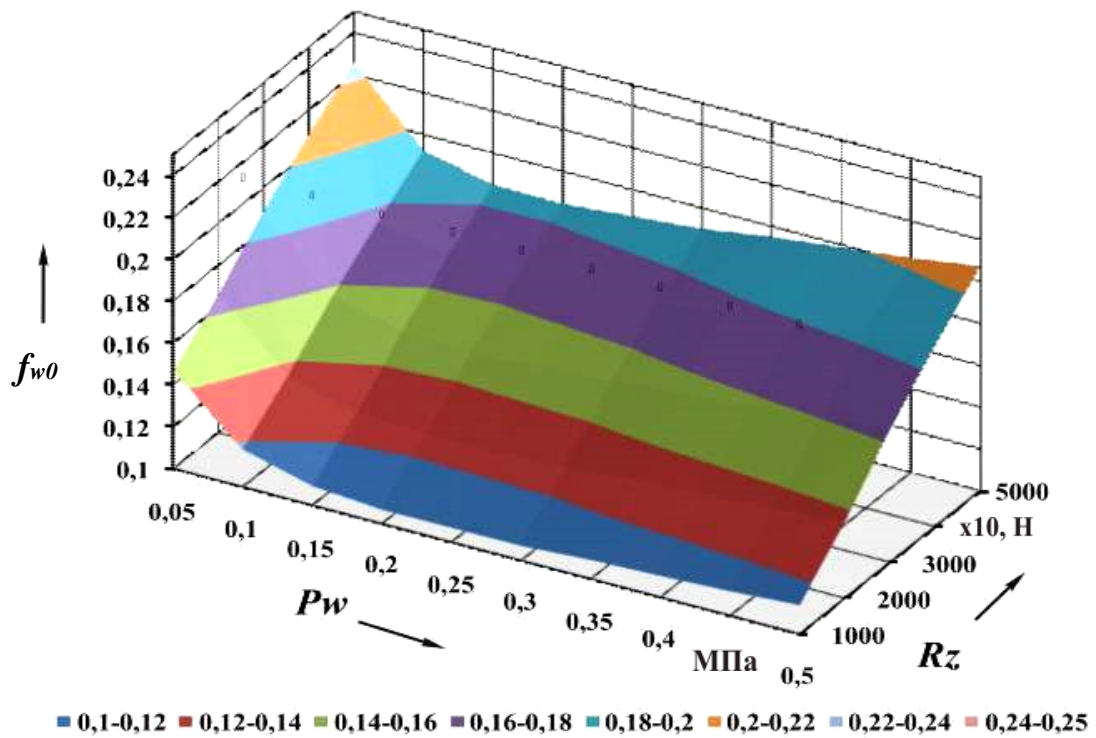


б)

Рисунок 4.2 – Зависимости f_{w0} в функции от R_z и P_w при третьем (а) и четвертом (б) проходе колеса по грунтовому основанию ДОП «суглинок-20».

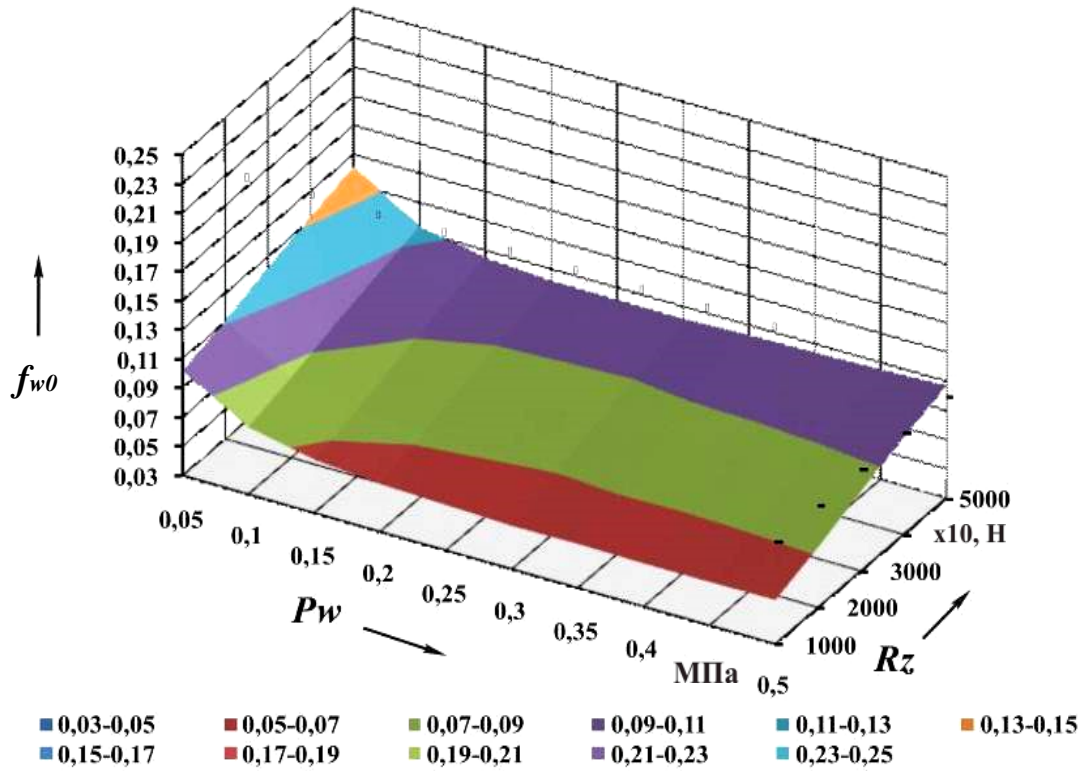


а)

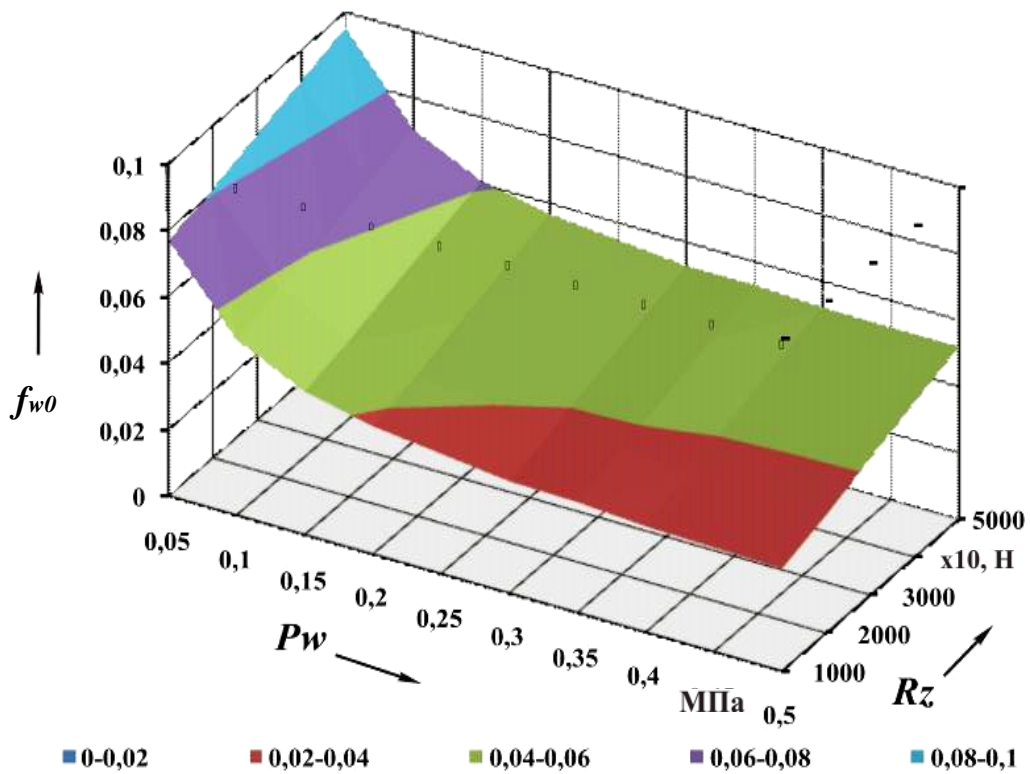


б)

Рисунок 4.3 – Зависимости f_{w0} в функции от R_z и P_w при первом (а) и втором (б) проходе колеса по грунтовому основанию ДОП «суглинок-35».

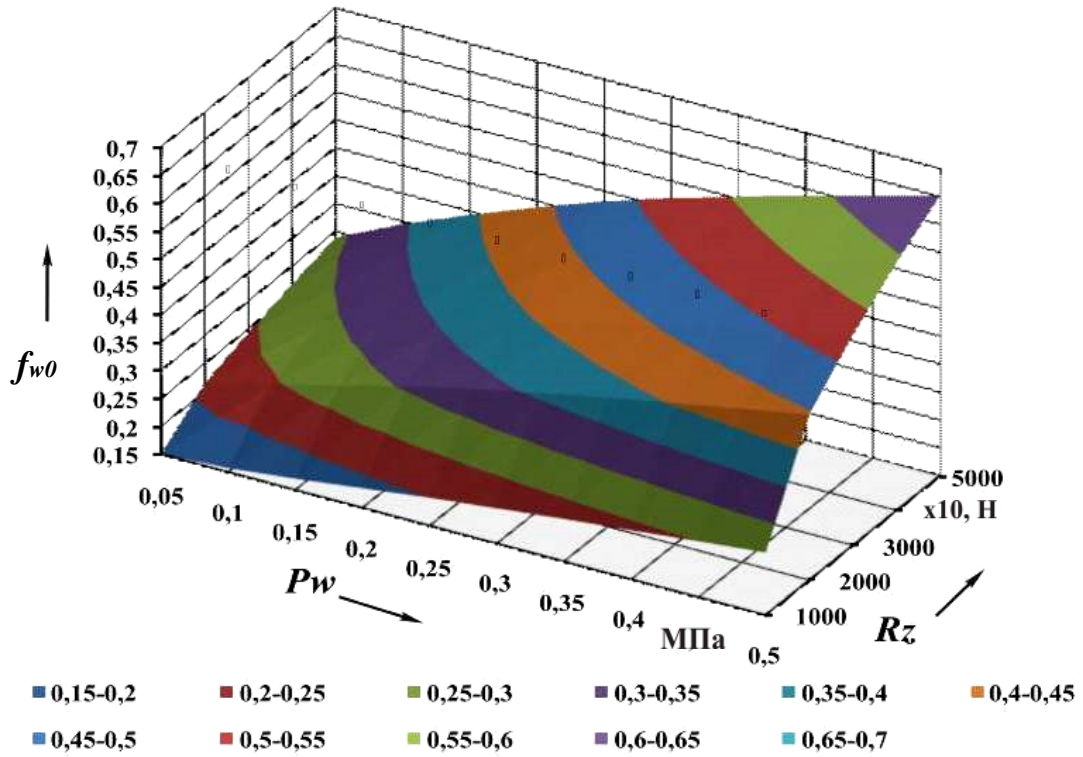


а)

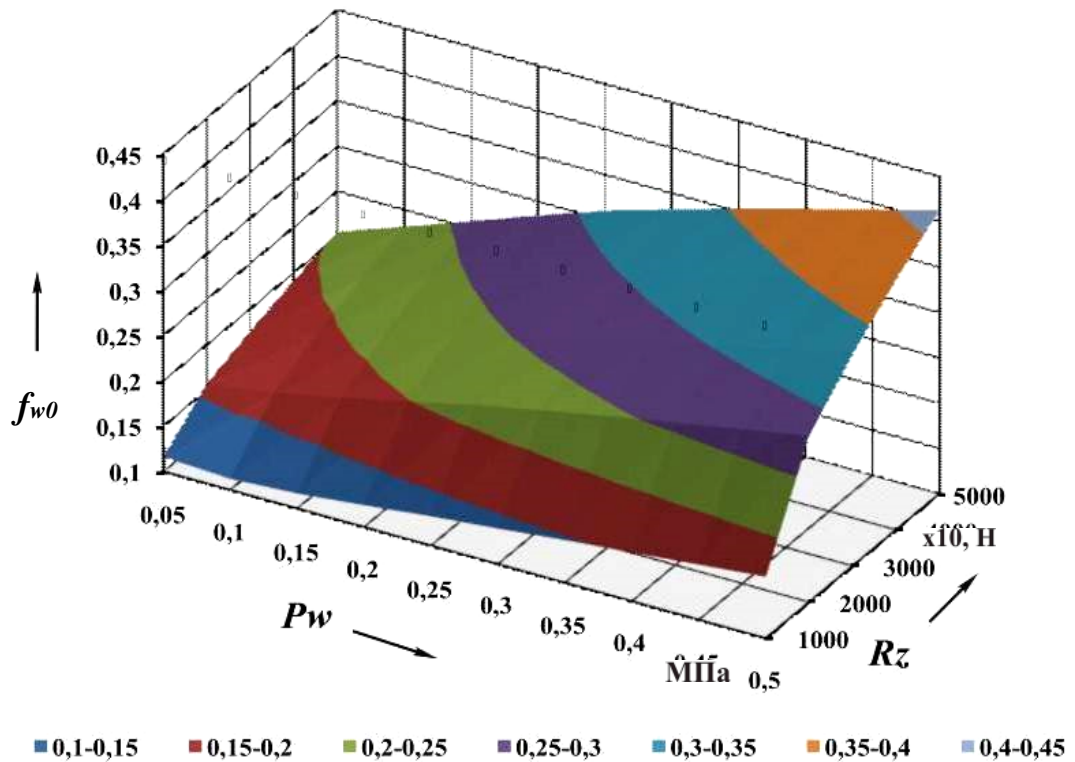


б)

Рисунок 4.4 – Зависимости f_{w0} в функции от R_z и P_w при третьем (а) и четвертом (б) проходе колеса по грунтовому основанию ДОП «суглинок-35».

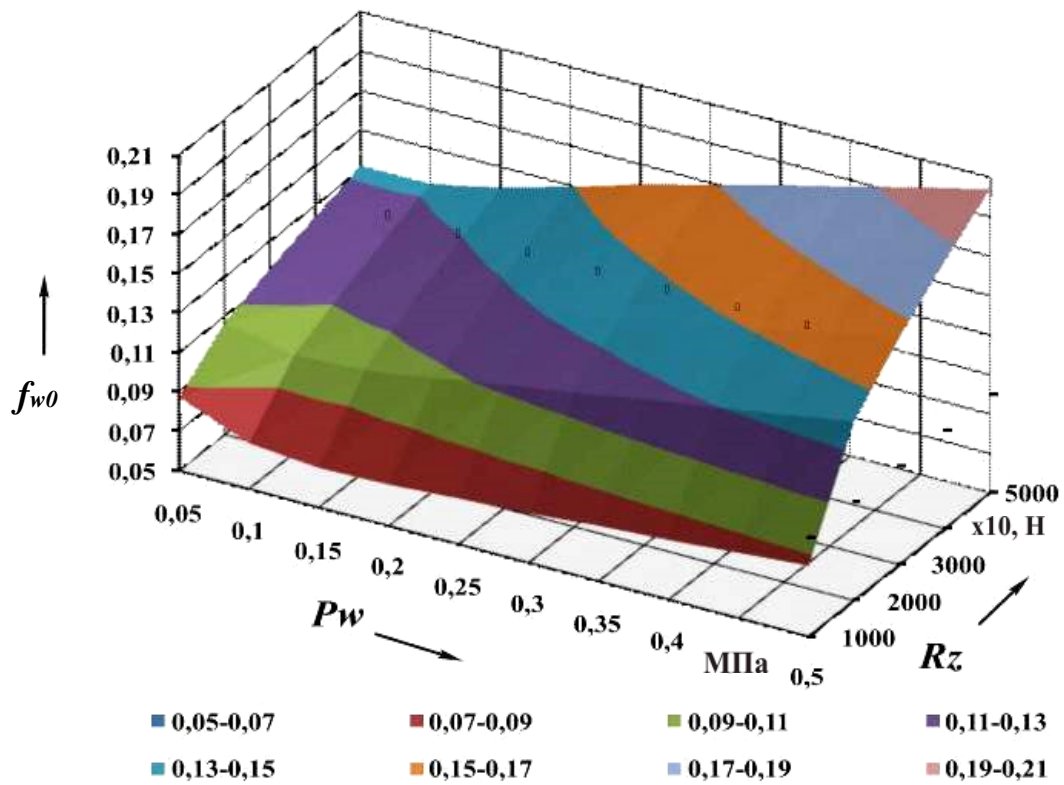


а)

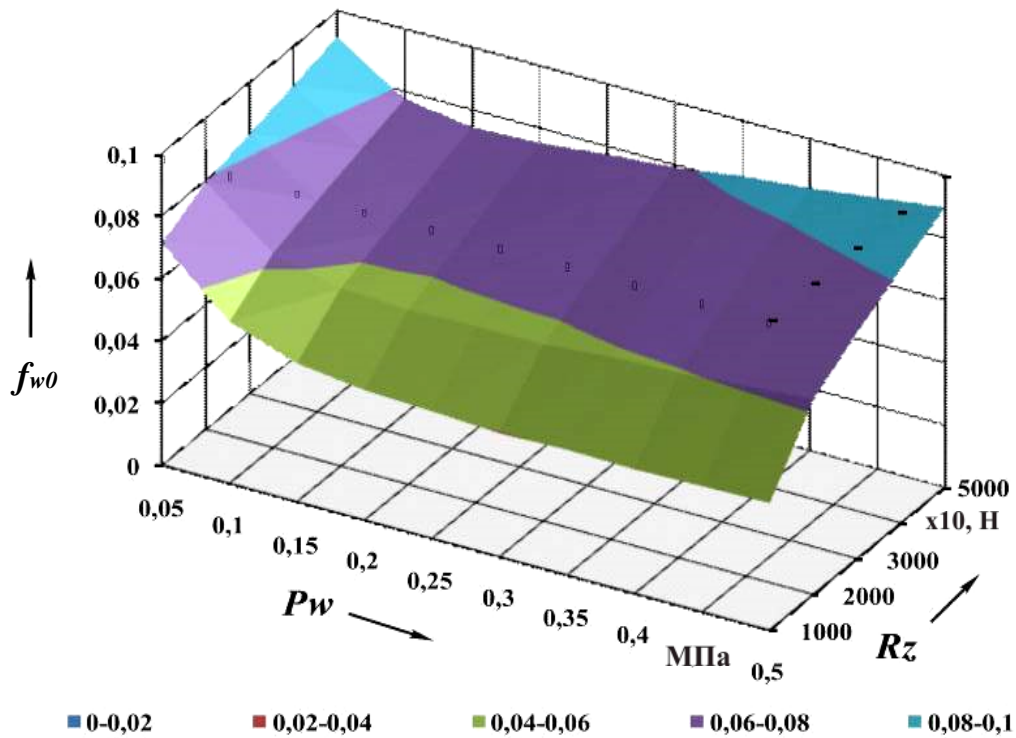


б)

Рисунок 4.5 – Зависимости f_{w0} в функции от R_z и P_w при первом (а) и втором (б) проходе колеса по грунтовому основанию ДОП «пашня».

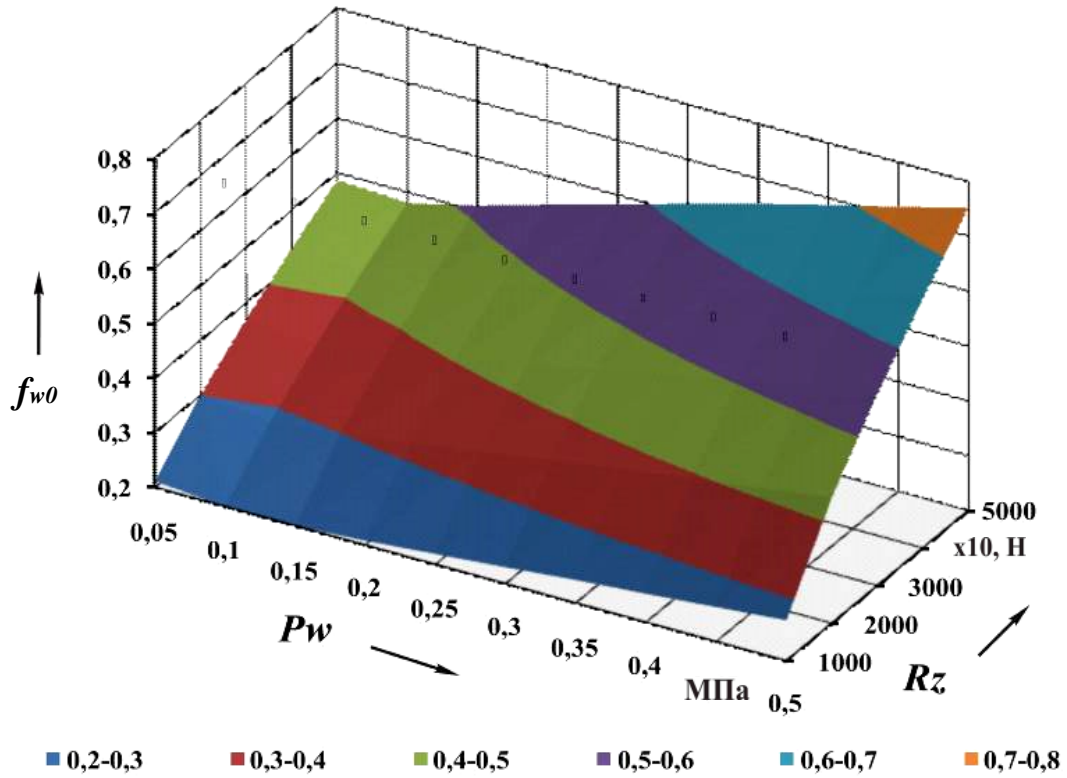


а)

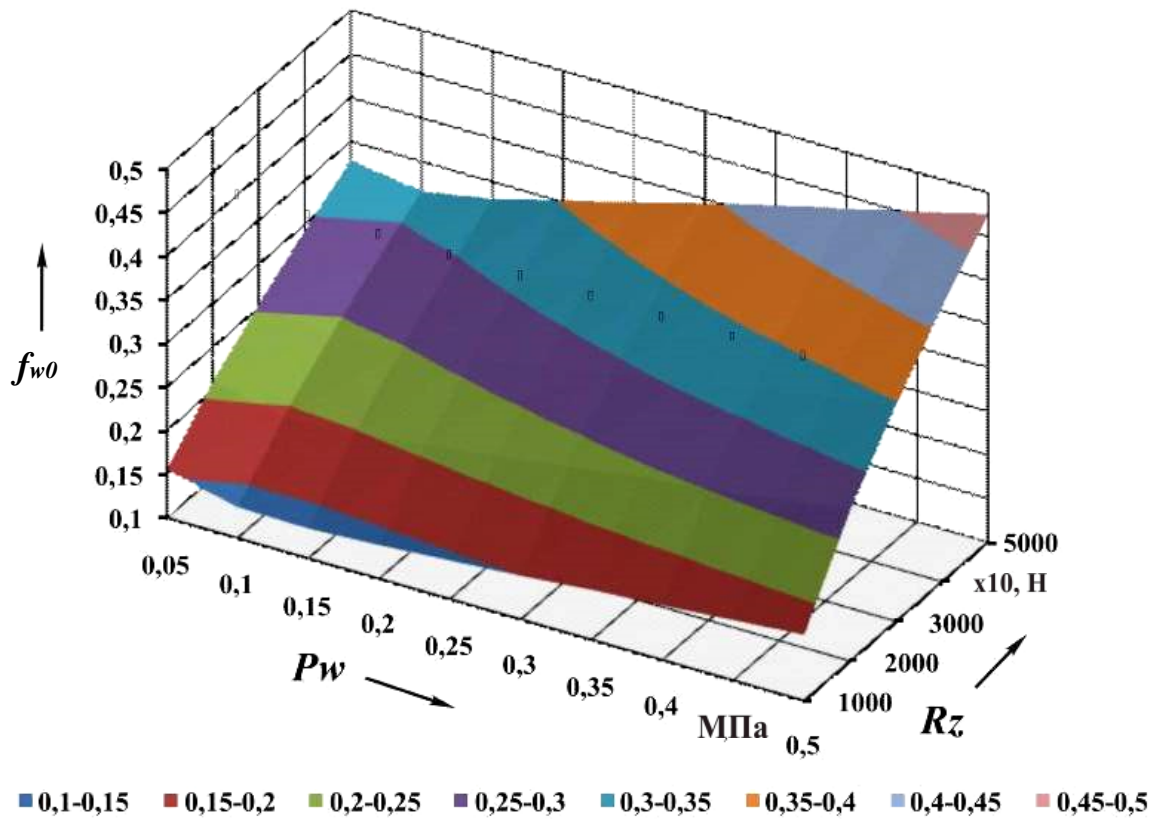


б)

Рисунок 4.6 – Зависимости f_{w0} в функции от R_z и P_w при третьем (а) и четвертом (б) проходе колеса по грунтовому основанию ДОП «пашня».

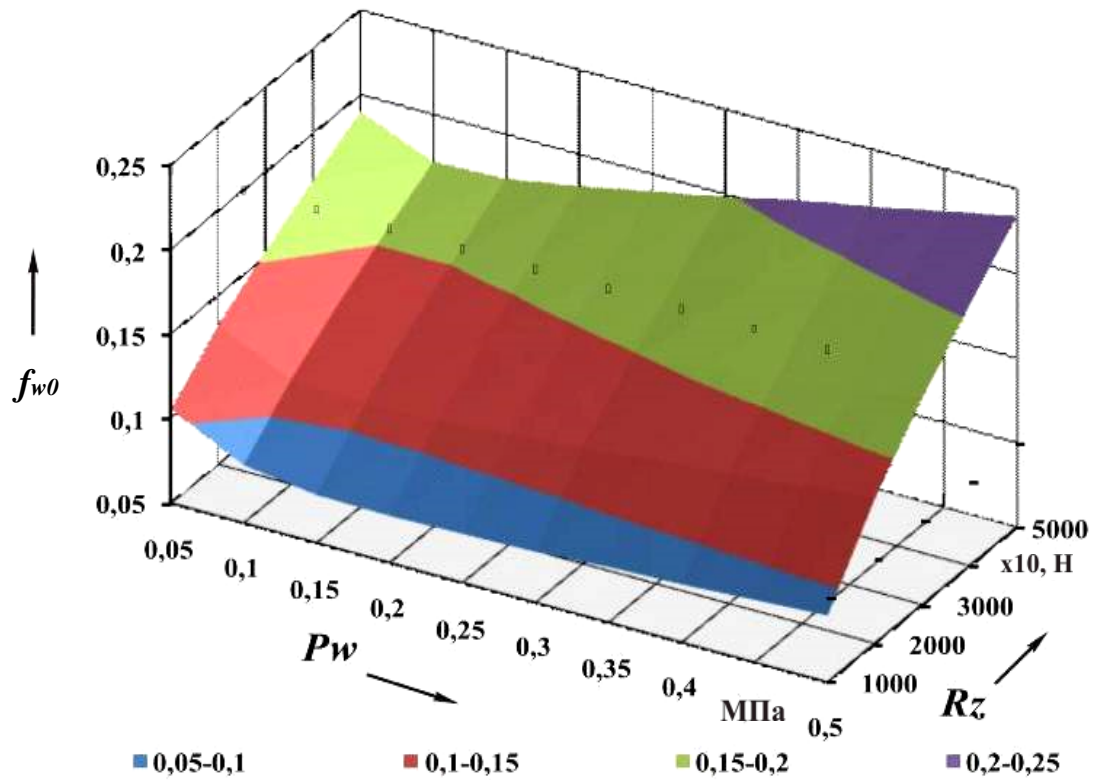


а)

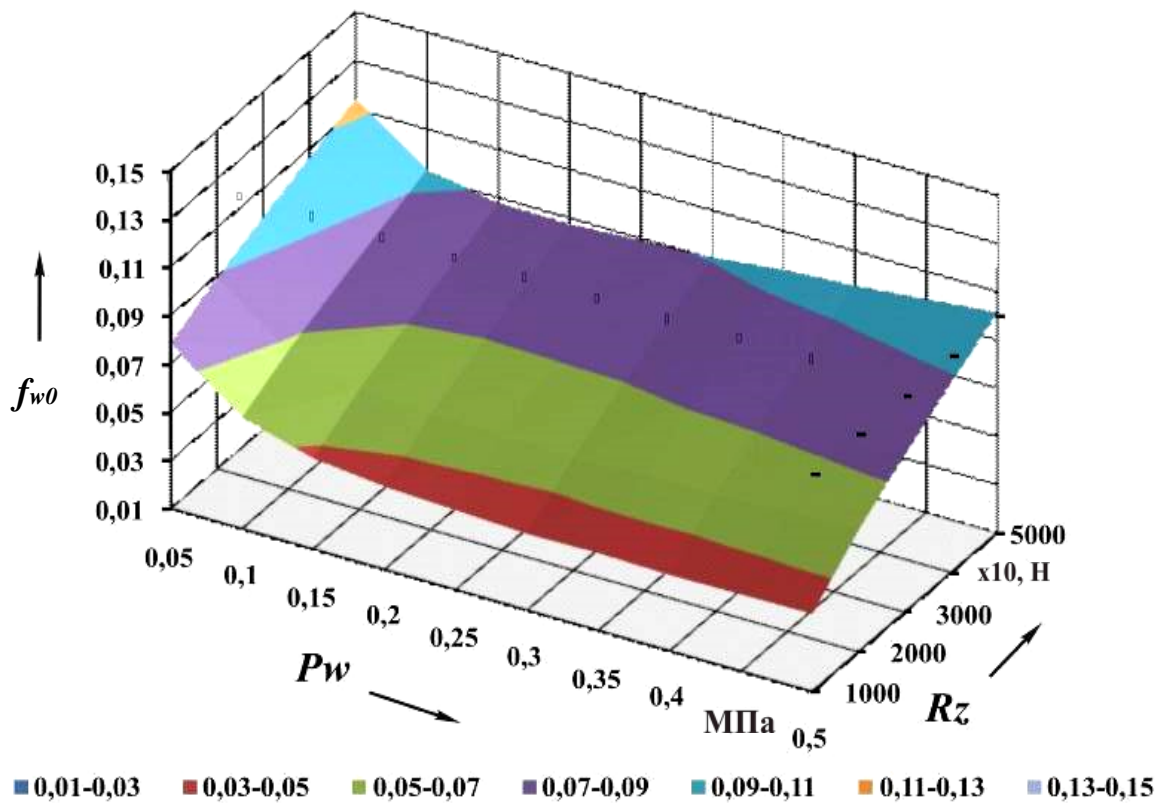


б)

Рисунок 4.7 – Зависимости f_{w0} в функции от R_z и P_w при первом (а) и втором (б) проходе колеса по грунтовому основанию ДОП «мокрый песок».



а)



б)

Рисунок 4.8 – Зависимости f_{w0} в функции от R_z и P_w при третьем (а) и четвертом (б) проходе колеса по грунтовому основанию ДОП «мокрый песок».

от 0,25 до 0,30 МПа. Дальнейшее увеличение нагрузки до 50000 Н влечет снижение значений рационального давления до 0,15–0,25 МПа;

– при качении колес по грунтовому основанию опорной поверхности «суглинок-35» значения рационального давления воздуха в шинах при первом проходе независимо от нагрузки лежат в интервале от 0,15 до 0,20 МПа. При втором проходе с нагрузкой в 10000 и 20000 Н значения рационального давления возрастают и находятся в пределах от 0,20 до 0,25 МПа. С увеличением нагрузки до 30000 Н значения рационального давления снижаются до 0,15–0,20 МПа и остаются неизменными с дальнейшим ее увеличением. При третьем проходе с нагрузкой в 10000 и 20000 Н значения рационального давления воздуха находятся в интервале от 0,30 до 0,35 МПа. С увеличением нагрузки до 30000 Н значения рационального давления снижаются до 0,25–0,30 МПа и остаются неизменными с дальнейшим ее увеличением. Для четвертого прохода колес характерен постоянный интервал значений давления воздуха в шинах независимо от варьирования нагрузкой, который соответствует значениям от 0,45 до 0,50 МПа;

– при качении колес по грунтовому основанию опорной поверхности «пашня» значения рационального давления воздуха при первом и втором проходах независимо от нагрузки лежат в интервале от 0,05 до 0,10 МПа. При третьем проходе с нагрузкой в 10000 Н значения рационального давления возрастают и находятся в пределах от 0,15 до 0,20 МПа, что также характерно при увеличении нагрузки до 20000 и до 30000 Н, при этом значения рационального давления лежат в интервале 0,10–0,15 МПа. Дальнейшее увеличение нагрузки до 40000 и 50000 Н приводит к снижению значений рационального давления воздуха в шинах колес до 0,05–0,10 МПа. Для четвертого прохода колес также характерно снижение значений рационального давления воздуха с увеличением нагрузки, при этом при нагрузке в 10000 Н – 0,30–0,35 МПа, при нагрузке 20000 Н – 0,20–0,25 МПа, при нагрузке от 30000 до 50000 Н – 0,15–0,20 МПа;

– при качении колес по грунтовому основанию опорной поверхности «мокрый песок» значения рационального давления воздуха при первом проходе с нагрузкой в 10000 и 20000 Н, при втором проходе с нагрузкой от 10000 до 40000

Н, а при третьем проходе с нагрузкой от 30000 до 50000 Н лежат в интервале значений от 0,10 до 0,15 МПа. С увеличением нагрузки при первом проходе колес до 30000–50000 Н, а при втором проходе до 50000 Н значения рационального давления воздуха снижаются и лежат в интервале от 0,05 до 0,10 МПа. Для четвертого прохода также характерно уменьшение значений рационального давления с увеличением нагрузки.

Интервалы значений рационального давления воздуха в шинах колес (P_w , МПа), соответствующие минимальным значениям коэффициента сопротивления качению, полученные в ходе проведения расчетного эксперимента, при установленной нагрузке и в зависимости от номера прохода колес по соответствующему грунтовому основанию представлены в таблицах 4.1–4.4.

Таблица 4.1 – Рациональные значения P_w (МПа) при движении по ДОП «суглинок-20».

R_z , Н	Номер прохода			
	первый	второй	третий	четвертый
10000	0,10–0,15	0,15–0,20	0,15–0,20	0,25–0,30
20000	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20	0,25–0,30
30000	0,05–0,10	0,10–0,15	0,15–0,20	0,15–0,20
40000	0,05–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20
50000	0,05–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20

Таблица 4.2 – Рациональные значения P_w (МПа) при движении по ДОП «суглинок-35».

R_z , Н	Номер прохода			
	первый	второй	третий	четвертый
10000	0,15–0,20	0,20–0,25	0,30–0,35	0,45–0,50
20000	0,15–0,20	0,20–0,25	0,30–0,35	0,45–0,50
30000	0,15–0,20	0,15–0,20	0,25–0,30	0,45–0,50
40000	0,15–0,20	0,15–0,20	0,25–0,30	0,45–0,50
50000	0,15–0,20	0,15–0,20	0,25–0,30	0,45–0,50

Таблица 4.3 – Рациональные значения P_w (МПа) при движении по ДОП «пашня».

R_z , Н	Номер прохода			
	первый	второй	третий	четвертый
10000	0,05–0,10	0,05–0,10	0,15–0,20	0,30–0,35
20000	0,05–0,10	0,05–0,10	0,10–0,15	0,20–0,25
30000	0,05–0,10	0,05–0,10	0,10–0,15	0,15–0,20
40000	0,05–0,10	0,05–0,10	0,05–0,10	0,15–0,20
50000	0,05–0,10	0,05–0,10	0,05–0,10	0,15–0,20

Таблица 4.4 – Рациональные значения P_w (МПа) при движении по ДОП «мокрый песок».

R_z , Н	Номер прохода			
	первый	второй	третий	четвертый
10000	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20	0,35–0,40
20000	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20	0,25–0,30
30000	0,05–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15	0,20–0,25
40000	0,05–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20
50000	0,05–0,10	0,05–0,10	0,10–0,15	0,15–0,20

Исключение составило только качение колес по грунтовому основанию «пашня» с нагрузкой в 40000 и 50000 Н. При этом значения рационального давления воздуха в шинах лежат в интервале от 0,05 до 0,10 МПа для трех последовательных проходов с каждой нагрузкой.

Основываясь на результатах проведенного расчетного эксперимента, можно сделать вывод, что при движении АМН по ДОП необходимо производить снижение давления воздуха в шинах колесного движителя индивидуально для колес каждой оси. Величина рационального давления воздуха в шинах колес АМН, соответствующая минимальным значениям коэффициента сопротивления качению, зависит от типа ДОП, физико-механических характеристик грунта, нагрузки приходящейся на каждое колесо АМН и расположения колес в колесной формуле АМН.

Следовательно, для повышения проходимости АМН, независимо от колесной формулы, является необходимым применение метода децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах.

4.2 Оценка эффективности предлагаемого способа повышения проходимости

Проведенные испытания АМН КАМАЗ-5350 в штатной комплектации по типичным ДОП с варьированием нагрузки на колеса осей автомобиля, с установленным давлением воздуха в шинах в соответствии с требованиями нормативно-технической документации завода-изготовителя [2] и рекомендованным по результатам проведенного исследования давлением для колес каждой оси позволяют оценить эффективность предлагаемого способа повышения проходимости за счет децентрализации давления воздуха в шинах АМН.

Рекомендованные по результатам проведенного исследования значения давления воздуха в шинах для колес каждой оси АМН при движении в условиях бездорожья и в ухудшенных дорожных условиях по характерным ДОП приведены в таблице 4.5.

Сравнительные результаты проведенных испытаний АМН по определению максимальной силы тяги на крюке при движении по характерным ДОП с давлением воздуха в шинах, соответствующим нормативно-технической документации завода-изготовителя, и давлением в колесах каждой оси, рекомендованным по результатам проведенного исследования, представлены в таблице 4.6 и на рисунке 4.9 (1 – движение АМН с давлением воздуха в шинах в соответствии с [2], 2 – движение АМН с рекомендованным давлением воздуха в шинах).

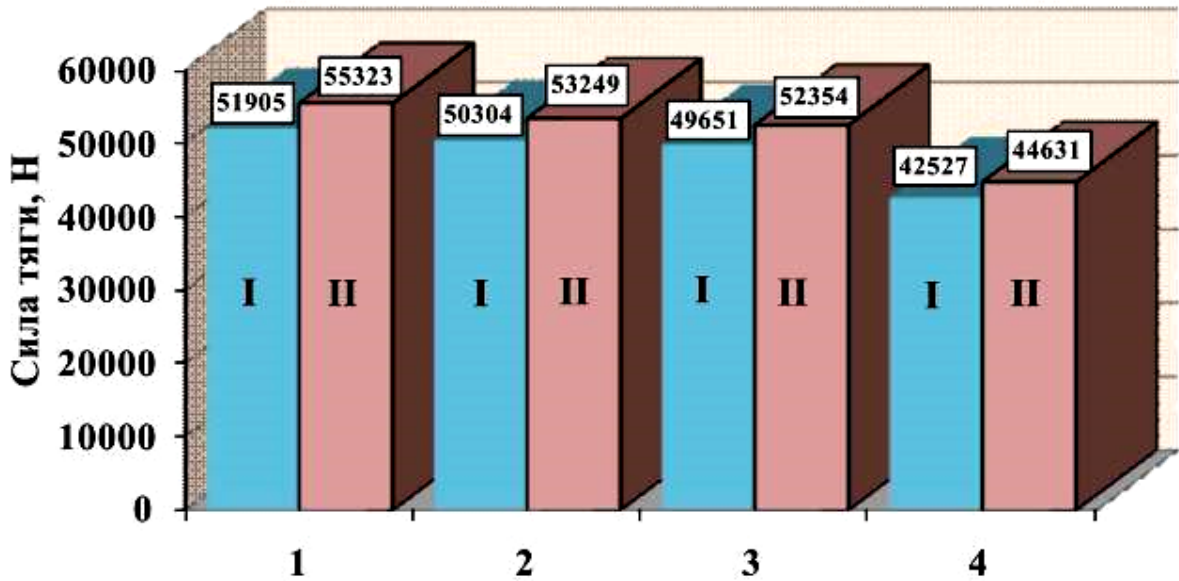
Анализ результатов проведенных испытаний, представленных в таблице 4.6 и на рисунке 4.9, позволяет сделать вывод, что использование предлагаемого способа повышения проходимости АМН за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах при движении по типичным ДОП дает увеличение силы тяги на крюке автомобиля в среднем на 5,7 % (при движении по грунтовой дороге – на 6,6 %, по мокрой грунтовой дороге – на 5,9 %, при движении по пашне – на 5,5 %, при движении по влажному речному песку – на 4,9 %).

Таблица 4.5 – Рекомендованные значения давления воздуха в шинах (P_w , МПа) для колес разных осей АМН при движении по ДОП в зависимости от приходящейся на каждое колесо нагрузки (R_z , Н).

R_z , Н	Расположение колеса в колесной формуле АМН		
	1	2	3
«суглинок-20»			
10000	0,10–0,15	0,15–0,20	0,15–0,20
20000	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20
30000	0,08–0,10	0,10–0,15	0,15–0,20
40000	0,08–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15
«суглинок-35»			
10000	0,15–0,20	0,20–0,25	0,30–0,35
20000	0,15–0,20	0,20–0,25	0,30–0,35
30000	0,15–0,20	0,15–0,20	0,25–0,30
40000	0,15–0,20	0,15–0,20	0,25–0,30
«пашня»			
10000	0,08–0,10	0,08–0,10	0,15–0,20
20000	0,08–0,10	0,08–0,10	0,10–0,15
30000	0,08–0,10	0,08–0,10	0,10–0,15
40000	0,08–0,10	0,08–0,10	0,08–0,10
«мокрый песок»			
10000	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20
20000	0,10–0,15	0,10–0,15	0,15–0,20
30000	0,08–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15
40000	0,08–0,10	0,10–0,15	0,10–0,15

Таблица 4.6 – Результаты определения максимальной силы тяги на крюке АМН КАМАЗ-5350 при движении по ДОП.

ДОП	Максимальная сила тяги на крюке, Н		
	1	2	% увеличения
«суглинок-20»	51905	55323	6,6
«суглинок-35»	50304	53249	5,9
«пашня»	49651	52354	5,5
«мокрый песок»	42527	44631	4,9



1 – движение по «суглинку-20»; 2 – движение по «суглинку-35»; 3 – движение по «пашне»; 4 – движение по «мокрому песку». I – давление воздуха в шинах в соответствии с [2]; II – движение АМН с рекомендованным давлением воздуха в шинах

Рисунок 4.9 – Результаты проведенных испытаний АМН КАМАЗ-5350 по определению максимальной силы тяги на крюке при движении по характерным ДОП.

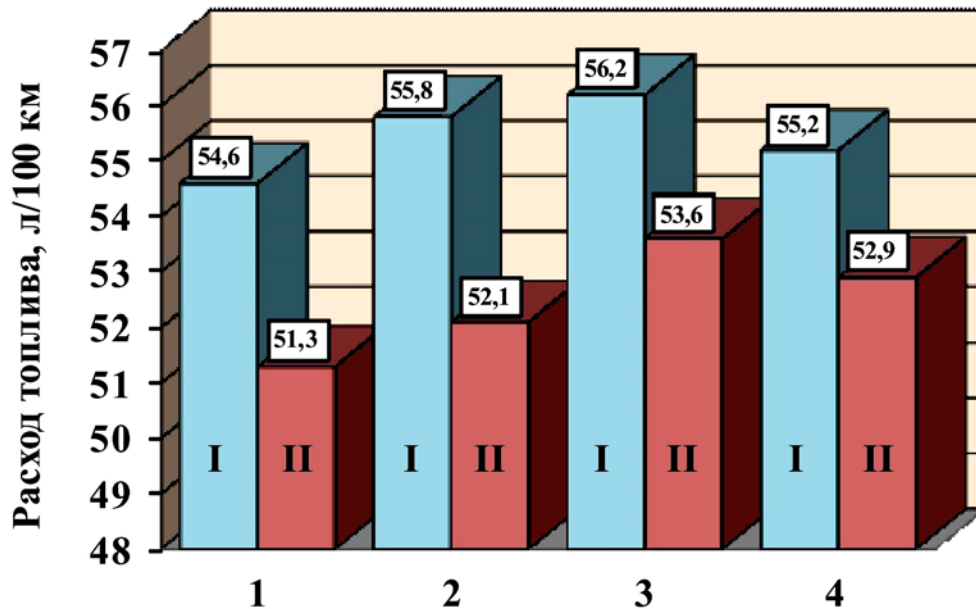
Сравнительные результаты проведенных испытаний АМН по определению расхода топлива при движении по характерным ДОП с давлением воздуха в шинах, соответствующим нормативно-технической документации завода-изготовителя, и давлением в колесах каждой оси, рекомендованным по результатам проведенного исследования, представлены в таблице 4.7 и на рисунке 4.10 (1 – движение АМН с давлением воздуха в шинах в соответствии с [2], 2 – движение АМН с рекомендованным давлением воздуха в шинах).

Анализ результатов проведенных испытаний, представленных в таблице 4.7 и на рисунке 4.10, позволяет сделать вывод, что использование предлагаемого способа повышения проходимости АМН за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах при движении по типичным ДОП дает снижение расхода топлива в среднем на 5,4 % (при движении по грунтовой дороге – на 6,1 %,

по мокрой грунтовой дороге – на 6,6 %, при движении по пашне – на 4,6 %, при движении по влажному речному песку – на 4,2 %).

Таблица 4.7 – Результаты определения расхода топлива АМН КАМАЗ-5350 при движении по ДОП

ДОП	Расход топлива, л/100 км		
	1	2	% снижения
«суглинок-20»	54,6	51,3	6,1
«суглинок-35»	55,8	52,1	6,6
«пашня»	56,2	53,6	4,6
«мокрый песок»	55,2	52,9	4,2



1 – движение по «суглинку-20»; 2 – движение по «суглинку-35»; 3 – движение по «пашне»; 4 – движение по «мокрому песку». I – давление воздуха в шинах в соответствии с [2]; II – движение АМН с рекомендованным давлением воздуха в шинах

Рисунок 4.10 – Результаты определения расхода топлива АМН КАМАЗ-5350 при движении по ДОП

Из данных, приведенных в таблицах (4.6, 4.7) и на рисунках (4.9, 4.10), следует, что использование предлагаемого способа повышения проходимости за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах на автомобиле

КАМАЗ-5350 обеспечивает в 1,05–1,07 раза большие значения реализуемой силы тяги на крюке и в 1,04–1,07 раза снижение расхода топлива, по сравнению с автомобилем, движущимся с давлением воздуха в шинах в соответствии с требованиями нормативно-технической документации на машину.

Таким образом, анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать вывод о том, что использование предлагаемого способа повышения проходимости АМН за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах обеспечивает автомобилю существенное приращение удельной силы тяги на крюке и снижение расхода топлива при движении по типичным ДОП.

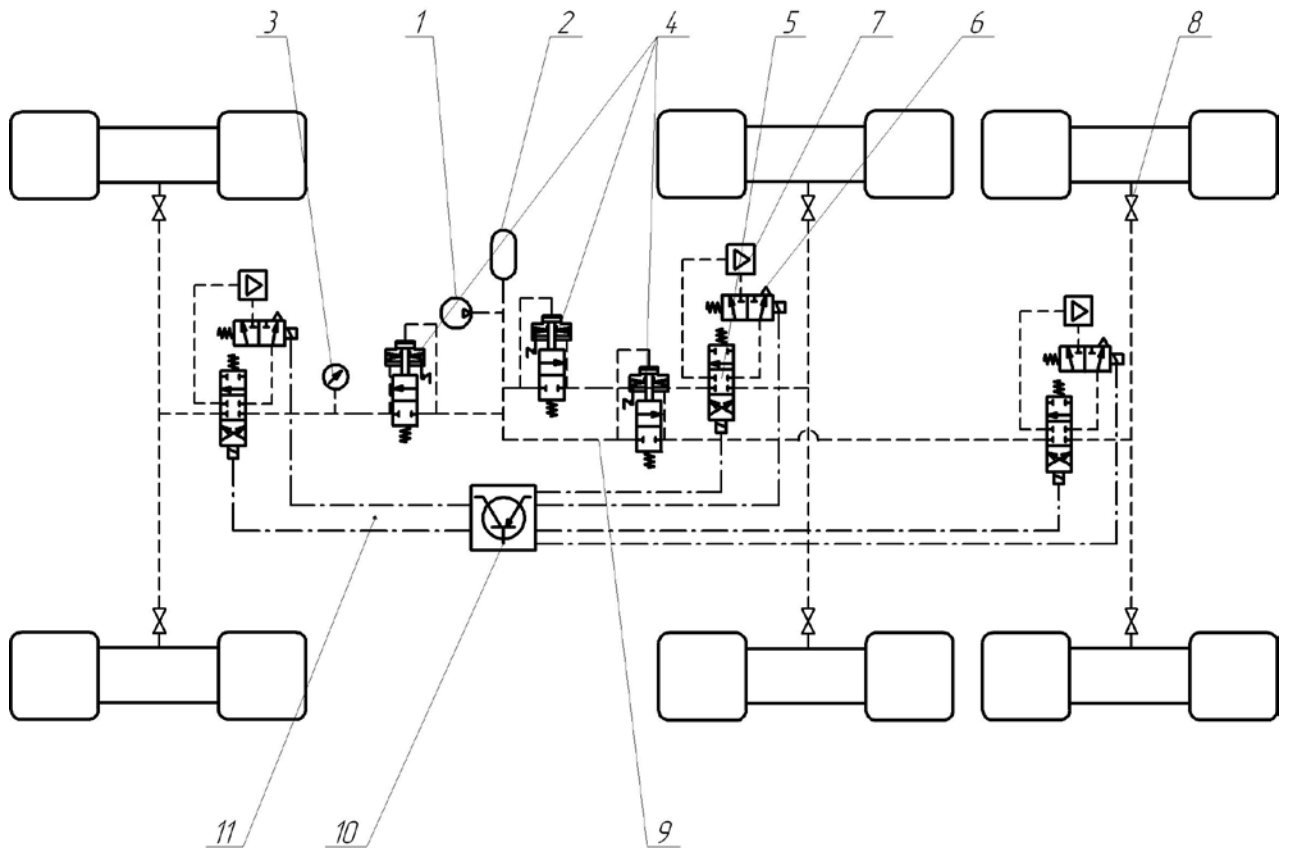
4.3 Предложения по совершенствованию конструкции системы регулирования давления воздуха в шинах автомобиля многоцелевого назначения

Для повышения эффективности штатной СРДВШ путем регулирования давления воздуха в шинах в зависимости от нагрузки, приходящейся на колеса каждой оси автомобиля, предлагается техническое решение, общий вид которого представлен на рисунке 4.11.

Регулирование давления воздуха в шинах колес каждой оси автомобиля производится за счет особенностей конструкции СРДВШ, которая содержит в своем составе: компрессор 1, пневматический баллон 2, датчик давления воздуха 3, регуляторы давления по числу осей 4, электромагнитные клапаны управления давлением 5, электромагнитные клапаны выпуска воздуха 6 и эжекторы 7 по числу осей, колесные клапаны 8, связанные между собой посредством трубопроводов и шлангов 9, электронный блок управления 10, который с помощью электрических цепей 11 соединен с электромагнитными клапанами управления давлением 5.

Работа СРДВШ осуществляется следующим образом. Давление воздуха в

системе создается компрессором 1 и аккумулируется в воздушном баллоне 2. От компрессора 1 и воздушного баллона 2 через регуляторы давления 4 воздух поступает к электромагнитным клапанам управления давлением 5. Регуляторы давления 4 изменяют давление воздуха, подводимого к электромагнитным клапанам управления давлением 5 в зависимости от вертикальной нагрузки, приходящейся на ось, за счет механической связи с подвеской транспортного средства.



1 – компрессор, 2 – пневматический баллон, 3 – датчик давления воздуха, 4 – регуляторы давления по числу осей; 5 – электромагнитные клапаны управления давлением; 6 – электромагнитные клапаны выпуска воздуха по числу осей; 7 – эжекторы; 8 – колесные клапаны; 9 – трубопроводы и шланги; 10 – электронный блок управления; 11 – электрические цепи

Рисунок 4.11 – Схема предлагаемой конструкции СРДВШ

(Патент Российской Федерации № 126992).

В случае выхода из строя электронной системы управления работа системы регулирования давления воздуха в шинах осуществляется как обычной системы (в режиме неавтоматического управления).

Применение СРДВШ указанной конструкции позволяет оперативно адаптировать колесный движитель АМН к дорожным условиям, устанавливая рациональное давление воздуха в шинах колес каждой оси в зависимости от нагрузки, приходящейся на колеса, что существенно повышает проходимость колесной машины при движении по деформируемой опорной поверхности, сокращает расход топлива и обеспечивает существенное приращение удельной силы тяги на крюке.

4.4 Технико-экономическая оценка применения системы децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах

Для обоснования эффективности технического решения по совершенствованию конструкции штатной СРДВШ АМН проведена технико-экономическая оценка решений, предложенных по результатам исследования.

Рекомендации предусматривают создание для АМН усовершенствованной автоматизированной СРДВШ, удовлетворяющей требованиям регулирования давления воздуха в шинах колес каждой оси в зависимости от приходящейся на них нагрузки.

Основным конструктивным изменением в проектируемом автомобиле будет установка СРДВШ, содержащей компрессор, пневматический баллон, датчик давления воздуха, регуляторы давления по числу осей, электромагнитные клапаны управления давлением, электромагнитные клапаны выпуска воздуха и эжекторы по числу осей, колесные клапаны, связанные между собой посредством трубопроводов и шлангов, электронный блок управления, который с помощью электрических цепей соединен с электромагнитными клапанами управления давлением.

В качестве ограничения принято то, что не реализуются мероприятия, приводящие к существенному увеличению срока службы агрегатов, и что реализация технического решения может быть осуществлена на имеющихся основных фон-

дах, т.е. не требуется больших капиталовложений в производственный процесс. Объем выпуска проектируемого АМН условно принят в количестве 10000 штук в год.

Данные по себестоимости изготовления агрегатов и узлов выпускаемого АМН взяты по заводским калькуляциям. Техничко-экономический расчет проведен на примере АМН КАМАЗ-5350, при этом себестоимость автомобиля:

$$S = \left(\begin{array}{l} S_{ДВ} + S_{КП} + S_{РК} + S_{К} + S_{ПМ} + S_{ПрМ} + S_{ЗМ} + S_{К} + S_{Ш} + S_{РУ} + S_{ПП} + S_{ПЗ} + \\ S_{КУЗ} + S_{Р} + S_{СРДВШ} \end{array} \right) \cdot \zeta, \quad (4.1)$$

где $S_{ДВ}$ – себестоимость двигателя;

$S_{КП}$ – себестоимость коробки передач;

$S_{РК}$ – себестоимость раздаточной коробки;

$S_{К}$ – себестоимость карданной передачи;

$S_{ПМ}$ – себестоимость переднего моста;

$S_{ПрМ}$ – себестоимость промежуточного моста;

$S_{ЗМ}$ – себестоимость заднего моста;

$S_{К}$ – себестоимость колес;

$S_{Ш}$ – себестоимость шин;

$S_{РУ}$ – себестоимость рулевого управления;

$S_{ПП}$ – себестоимость подвески передней в сборе;

$S_{ПЗ}$ – себестоимость подвески задней в сборе;

$S_{КУЗ}$ – себестоимость кузова в сборе;

$S_{Р}$ – себестоимость рамы в сборе;

$S_{СРДВШ}$ – себестоимость системы регулирования давления воздуха в шинах;

ζ – коэффициент, учитывающий затраты на сборку и себестоимость остальных элементов автомобиля. Для автомобилей средней грузоподъемности $\zeta = 1,15$.

Расчет себестоимости проектируемой СРДВШ:

$$S_{СРДВШ} = k(S'_{СРДВШ} + S_{ЭЖ} + S_{ЭМК} + S_{РД})N_{год}, \quad (4.2)$$

где k – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на сборку и установку ($k=1,25$);

$S'_{СРДВШ}$ – себестоимость СРДВШ выпускаемого автомобиля;

$S_{ЭЖ}$ – себестоимость эжекторов;

$S_{ЭМК}$ – себестоимость электромагнитных клапанов;

$S_{РД}$ – себестоимость регуляторов давления;

$N_{год}$ – годовой объем выпуска АМН.

Себестоимости основных агрегатов и узлов существующего и проектируемого автомобиля приведены в таблице 4.8.

При расчете себестоимости автомобиля примем во внимание, что серийность изготовления учтена при определении себестоимости агрегатов.

Расчет производительности проектируемого и выпускаемого автомобилей проведен для эксплуатации в одинаковых дорожных условиях при частичном использовании грунтовых дорог, одинаковой длине груженой поездки, механизированных погрузочно-разгрузочных работах.

Годовая производительность:

$$W_{год} = K_{год} \cdot \rho \cdot q, \quad (4.3)$$

где $K_{год}$ – годовой пробег автомобиля;

ρ – коэффициент использования пробега для АМН;

q – грузоподъемность автомобиля.

$$K_{год} = K_{cc} \cdot D_k, \quad (4.4)$$

где K_{cc} – среднесуточный пробег автомобиля;

D_k – годовой календарный фонд времени.

$v_э$ – средняя эксплуатационная скорость автомобиля:

$$v_э = \frac{1}{\frac{1}{v_T} + \frac{t_{np}\rho}{15}}, \quad (4.5)$$

где v_T – средняя техническая скорость;

t_{np} – время погрузочно-разгрузочных работ, приходящееся на одну поездку.

Таблица 4.8 – Себестоимость основных агрегатов и узлов выпускаемого и проектируемого автомобилей.

Агрегат, узел	Обозначение	Количество	Оптовая цена, руб.	
			выпускаемого	проектируемого
двигатель КамАЗ 740.31-240	$S_{ДВ}$	1	273315	273315
коробка передач	$S_{КП}$	1	52025	52025
раздаточная коробка	$S_{РК}$	1	60219	60219
вал карданный в сборе	$S_{К}$	4	6413	6413
мост передний в сборе	$S_{ПМ}$	1	65375	65375
мост промежуточный в сборе	$S_{ПрМ}$	1	120608	120608
мост задний в сборе	$S_{ЗМ}$	1	120608	120608
колесо в сборе	$S_{КОЛ}$	6	29488	29488
шина 425/85R21 в сборе	$S_{Ш}$	6	51070	51070
рулевое управление в сборе	$S_{РУ}$	1	30587	30587
подвеска передняя в сборе	$S_{ПП}$	2	20501	20501
Подвеска задняя в сборе	$S_{ПЗ}$	2	23280	23280
кузов в сборе	$S_{КУЗ}$	1	254522	254522
рама в сборе	$S_{Р}$	1	135857	135857
СРДВШ	$S_{СРДВШ}$	1	3564	5675
эжектор	$S_{ЭЖ}$	3	-	1564
электропневмоклапан	$S_{ЭПК}$	6	-	1285
регулятор давления	$S_{РД}$	3	-	1863
Себестоимость автомобиля, руб.			1247432	1252114

Расчет затрат на топливо:

$$S_m = \frac{(Q_{m1} + Q_{m2} \cdot q \cdot \gamma \cdot \rho) \cdot K_{год} \cdot k_{зим} \cdot C_m}{100}, \quad (4.6)$$

где Q_{m1} – линейная норма расхода топлива для выпускаемого автомобиля;

Q_{m2} – норма расхода топлива на транспортную работу для проектируемого;

$k_{зим}$ – коэффициент, учитывающий повышенный расход топлива при эксплуатации в зимних условиях;

C_m – оптовая цена топлива;

γ – коэффициент использования грузоподъемности.

Затраты на проведение работ контроля технического состояния, технического обслуживания и эксплуатационных ремонтов:

$$S_{мэр} = \frac{Z_{мэр} \cdot K_{год}}{1000}, \quad (4.7)$$

где $Z_{мэр}$ – удельные затраты на проведение работ контроля технического состояния, технического обслуживания и эксплуатационных ремонтов с учетом ежедневного технического обслуживания.

Заработная плата водителей:

$$S_{вод} = \frac{0,127 \cdot C_{мар} \cdot W_{год}}{q} \left(\frac{t_{нр}}{K_{зр}} + \frac{1}{v_{э} \cdot \gamma \cdot \rho} \right), \quad (4.8)$$

где $C_{мар}$ – часовая тарифная ставка водителя.

Накладные затраты при одинаковой грузоподъемности одинаковы для проектируемого и выпускаемого автомобиля:

$$S_{нак} = 50(611 + 55,5q + 1,58q^2), \quad (4.9)$$

Годовые эксплуатационные затраты без амортизационных отчислений:

$$S_{ЭК} = c(S_m + S_{мэр} + S_{вод} + S_{нак}), \quad (4.10)$$

где c – поправочный коэффициент цен.

Нижний предел оптовой цены:

$$C_{ниж} = S_n (1 + k_p), \quad (4.11)$$

где k_p – норматив рентабельности предприятия.

Верхний предел оптовой цены:

$$C_{вн} = C_v \frac{W_{годн}}{W_{годв}} \frac{1}{T_{слв}} + \frac{S_{экв} \frac{W_{годн}}{W_{годв}} - S_{эkn}}{\frac{1}{T_{слн}}} \pm \Delta K_{ЭК}, \quad (4.12)$$

где $T_{сл}$ – срок службы выпускаемого и проектируемого автомобилей;

$\Delta K_{ЭК}$ – изменение удельных капитальных затрат.

Амортизационные отчисления:

$$S_{ам} = \left(\frac{m_{ам} \cdot C_n}{100} + \frac{m'_{ам} \cdot C_n \cdot K_{год}}{100000} \right) k_{ам}, \quad (4.13)$$

где $m_{ам}$ – нормы амортизационных отчислений на реновацию;

$m_{ам}'$ – нормы амортизационных отчислений на капитальный ремонт;

C_n – оптовая цена автомобиля;

$k_{ам}$ – поправочный коэффициент амортизационных отчислений.

Годовые эксплуатационные затраты:

$$S_9 = S_{эк} + S_{ам}. \quad (4.14)$$

Удельные капиталовложения потребителя в автомобиль:

$$C_{уд} = \frac{C_n}{W_{год}}. \quad (4.15)$$

Удельные эксплуатационные затраты составляют:

$$S_{экуд} = \frac{S_n}{W_{год}}. \quad (4.16)$$

Годовой экономический эффект:

$$\varepsilon_{год} = [(S_{эке} + E_n \cdot C_{удв}) - (S_{эки} + E_n \cdot C_{удп})] \cdot W_{годп}. \quad (4.17)$$

В таблице 4.9 приведены итоговые данные экономической оценки.

Таблица 4.9 – Экономическая оценка результатов работы

Наименование показателя	Выпускаемый автомобиль	Проектируемый автомобиль
Объем работы за год, т·км	17358,8	17971,5
Годовые эксплуатационные затраты, руб.	1086600,5	1105227,2
Удельные эксплуатационные затраты, руб./т·км	74,0	72,7
Оптовая цена машины, руб.	2118000,0	2125245,6
Удельные капиталовложения потребителя, руб./т·км	122,7	139,8
Годовой эффект на один автомобиль, руб.		19184,9

4.5 Выводы

1. На основе проведенного расчетного эксперимента установлено, что для каждого выбранного типа ДОП в сочетании номера прохода одиночного эластичного колеса с вертикальной нагрузкой на него существует диапазон рационального давления воздуха в шине, обеспечивающий минимальные энергетические затраты на его качение:

– для грунтовой поверхности «суглинок-20»:

а) при нагрузке на колесо 10000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа, 0,15–0,20 МПа, 0,25–0,30 МПа;

б) при нагрузке на колесо 20000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,10–0,15 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа, 0,25–0,30 МПа;

в) при нагрузке на колесо 30000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа, 0,15–0,20 МПа;

г) при нагрузке на колесо 40000 и 50000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа;

– для грунтовой поверхности «суглинок-35»:

а) при нагрузке на колесо 10000 и 20000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,15– 0,20 МПа, 0,20 – 0,25 МПа, 0,30 – 0,35 МПа, 0,40 – 0,45 МПа;

б) при нагрузке на колесо 30000, 40000 и 50000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,15–0,20 МПа, 0,15–0,20 МПа, 0,25–0,30 МПа, 0,45–0,50 МПа;

– для грунтовой поверхности «пашня»:

а) при нагрузке на колесо 10000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,05–0,10 МПа, 0,15–0,20 МПа, 0,30–0,35 МПа;

б) при нагрузке на колесо 20000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,05–0,10 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,20–0,25 МПа;

в) при нагрузке на колесо 30000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,50–0,10 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа;

г) при нагрузке на колесо 40000 и 50000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,05–0,10 МПа, 0,05–0,10 МПа, 0,15–0,20 МПа;

– для грунтовой поверхности «мокрый песок»:

а) при нагрузке на колесо 10000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,10–0,15 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа, 0,35–0,40 МПа;

б) при нагрузке на колесо 20000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,10–0,15 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа, 0,25–0,30 МПа;

в) при нагрузке на колесо 30000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,20–0,25 МПа;

г) при нагрузке на колесо 40000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа;

д) при нагрузке на колесо 50000 Н и номере прохода 1, 2, 3, 4 диапазон рационального давления воздуха в шине соответственно – 0,05–0,10 МПа, 0,05–0,10 МПа, 0,10–0,15 МПа, 0,15–0,20 МПа.

2. На основе полученных данных предлагается способ повышения проходимости АМН путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах

в функции от нагрузки, приходящейся на колеса, и конструктивного их расположения в колесной формуле автомобиля.

3. Проведенная экспериментальная оценка эффективности повышения проходимости АМН за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах показала существенное увеличение показателей проходимости.

Использование предлагаемого способа повышения проходимости на автомобиле КАМАЗ-5350 за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах обеспечивает в 1,05–1,07 раза большие значения реализуемой силы тяги на крюке и в 1,04–1,07 раза снижение расхода топлива по сравнению с автомобилем, движущемся с давлением воздуха в шинах в соответствии с требованиями нормативно-технической документации на машину.

4. Для повышения проходимости АМН путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах разработана автоматизированная СРДВШ (Патент Российской Федерации № 126992). Применение автоматизированной СРДВШ предлагаемой конструкции позволяет оперативно адаптировать колесный движитель АМН к дорожным условиям, устанавливая рациональное давление воздуха в шинах колес каждой оси, в зависимости от нагрузки, приходящейся на колеса.

5. Проведенное технико-экономическое обоснование предлагаемого решения показывает, что внедрение в производство разработанной конструкции СРДВШ не требует значительных экономических и производственных затрат. Годовой эффект от выпуска одного автомобиля составит 19184,9 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании изложено новое научно обоснованное техническое решение повышения опорной проходимости АМН за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах, которое имеет существенное значение в улучшении эксплуатационных свойств полноприводных автомобилей и обеспечении эффективности их использования в экономике страны.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. В диссертационной работе за основу принята известная математическая модель движения многоосных автомобилей по деформируемой опорной поверхности, разработанная учеными 21 НИИ МО РФ и МГТУ имени Н.Э. Баумана. Разработанная на ее основе математическая модель позволяет учесть коэффициент сопротивления движению колес автомобиля функциональной зависимостью от внешних факторов: номера прохода колес по колее, нагрузок, приходящихся на них и установленного давления воздуха в шинах. Влияние факторов практически учитывается через частные функции коррекции коэффициента сопротивления качению, полученные экспериментальным путем. Разработанная математическая модель позволяет расчетным путем определить показатели характеристик прямолинейного движения многоосного автомобиля по деформируемой опорной поверхности.

2. Обработка результатов проведенного лабораторного экспериментального исследования качения колеса на стенде «грунтовый канал» по суглинистому грунту различной влажности и мокрому речному песку, позволила выявить характер влияния на коэффициент сопротивления качению нормальной нагрузки, давления воздуха, номера прохода колеса по грунтовому основанию и установить функциональную зависимость от этих параметров, определить значения соответствующих коэффициентов коррекции коэффициента сопротивления качению для каждого типа грунта, по которому осуществлялось исследование качения колеса. С увеличением числа проходов колеса по колее, при варьировании давлением воздуха в шине и вертикаль-

ной нагрузки, значение коэффициента сопротивления качению для всех рассмотренных грунтов уменьшается.

3. Проведенное натурное экспериментальное исследование в полевых условиях позволило провести оценку адекватности разработанной математической модели и эффективности предлагаемого способа повышения проходимости АМН. Погрешность модели не превышает 12 %, что вполне удовлетворительно для инженерных расчетов. По результатам проведенных натуральных экспериментальных исследований на образце АМН КАМАЗ-5350 обосновано, что для повышения эффективности использования автомобилей при движении по труднопроходимым участкам местности целесообразно понижать давление воздуха в колесах каждой оси в зависимости от приходящейся на них нагрузки и их расположения в колесной формуле автомобиля, то есть использовать децентрализацию регулирования давления воздуха в шинах. Для каждого типа грунта, в зависимости от нагрузки, приходящейся на колеса автомобиля и конструктивного их расположения в колесной формуле, существует диапазон рациональных значений давления воздуха в шинах, соответствующий наименьшим значениям коэффициента сопротивления движению и обеспечивающий минимальные энергетические затраты на движение. Соотношение рациональных значений давления воздуха в шинах 1–2–3–4 осей (по отношению к первой оси) при движении по ДОП поверхностям следующее:

– для снаряженного автомобиля: по «суглинку-20» – 1,0; 1,4; 1,4; 2,2; по «суглинку-35» – 1,0; 1,3; 1,9; 2,7; по «пашне» – 1,0; 1,0; 2,3; 4,3; по «мокрому песку» – 1,0; 1,0; 1,4; 3,0;

– для автомобиля с полной массой: по «суглинку-20» – 1,0; 1,7; 1,7; 2,3; по «суглинку-35» – 1,0; 1,0; 1,6; 2,7; по «пашне» – 1,0; 1,0; 1,0; 2,3; по «мокрому песку» – 1,0; 1,0; 1,7; 2,3.

4. Проведенными на образце АМН КАМАЗ-5350 экспериментальными исследованиями, с учетом выработанных рекомендаций по децентрализации процесса регулирования давления воздуха в шинах при движении в типичных условиях эксплуатации по труднопроходимым участкам местности, подтверждено снижение расхода топлива в среднем на 5,4 % и увеличение силы тяги на крюке автомобиля в среднем

на 5,7 %. Для повышения проходимости АМН путем децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах разработана автоматизированная СРДВШ (Патент Российской Федерации № 126992), применение которой позволит оперативно адаптировать колесный движитель автомобиля к движению по деформируемым грунтам, устанавливая рациональное давление воздуха в шинах колес каждой оси в зависимости от нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, В.Н. Оценка и выбор пневматических шин регулируемого давления для армейских автомобилей / В.Н. Абрамов, М.П. Чистов, И.В. Веселов, А.А. Колтуков; под. общ. ред. В.В. Шипилова. – Бронницы: ФГУП 21 НИИИ МО РФ, 2006. – 223 с.
2. Автомобили КАМАЗ семейства «Мустанг». Руководство по эксплуатации 4350-390230РЭ / под общ. ред. В.В. Васина. – Набережные Челны: ОАО «КАМАЗ», 2010. – 18-3 с.
3. Автомобильный справочник BOSCH / пер. с англ. – М.: Изд-во За рулем, 2002. – 896 с.
4. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
5. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
6. Агейкин, Я.С. Расчет проходимости автомобилей при проектировании // Теория, проектирование и испытания автомобилей: межвуз. сб. научн. тр. – 1982. – Вып. 1. – С. 8–15.
7. Андреев, А.Ф. О затратах мощности в движителях полноприводных колесных тракторов / А.Ф. Андреев, В.В. Ванцевич, А.Х. Лефаров и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 1983. – № 12. – С. 8–10.
8. Антонов, Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / Д.А. Антонов. – М.: Машиностроение, 1978. – 215 с.
9. Аксенов, П.В. Многоосные автомобили / П.В. Аксенов. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
10. Аксенов, П.В. Многоосные автомобили / П.В. Аксенов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 280 с.

11. Антонов, А.С. Армейские автомобили. Теория / А.С. Антонов, Ю.А. Кононович, Е.Н. Магидович, В.С. Прозоров; под общ. ред. А.С. Антонова. – М.: Воениздат, 1970. – 526 с.
12. Антонов, Д.А. Теория движения боевых колесных машин / Д.А. Антонов, С.И. Беспалов; под общ. ред. А.С. Антонова. – М.: Изд. Академии БТВ им. Р.Я. Малиновского, 1993. – 385 с.
13. Бабков, В.Ф. Автомобильные дороги / В.Ф. Бабков. – М.: Транспорт, 1983. – 280 с.
14. Бабков, В.Ф. Сопротивление грунтов деформированию с различными скоростями / В.Ф. Бабков // Труды МАДИ. №16, 1955. – С. 107–118.
15. Бабков, В.Ф. Сопротивление качению колеса по деформирующейся опорной поверхности / В.Ф. Бабков // Труды МАДИ. – 1955. – №16. – С. 79–106.
16. Бабков, В.Ф. Проходимость колесных машин по грунту / В.Ф. Бабков, А.К. Бируля, В.М.Сиденко; под общ. ред. В.Ф. Бабкова. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 189 с.
17. Барахтанов, Л.В. Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец; под общ. ред. Л.В. Барахтанова. – Н.Новгород: НГТУ, 1996. – 198 с.
18. Бахмутов, С.В. Научные основы параметрической оптимизации автомобиля по критериям управляемости и устойчивости: дис. ... д-ра тех. наук: 05.05.03 / С.В. Бахмутов. – М., 2001. – 354 с.
19. Бахмутов, С.В. Оценка силовых реакций автомобиля на управляющие и возмущающие воздействия / С.В. Бахмутов. – М.: Академия проблем качества, 2001. – 134 с.
20. Безбородова, Г.Б. Исследование проходимости автомобилей / автореф. ... дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / Г.Б. Безбородова. – М., 1970. – 39 с.
21. Беккер, М.Г. Введение в теорию систем местность-машина / М.Г. Беккер. – Пер. с англ. под ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.

22. Батанов, А.Ф. Развитие расчетных моделей определения, сопротивления движению / А.Ф. Батанов, Н.А. Забавников, А.В. Мирошниченко, В.Н. Наумов // Труды МВТУ. – 1984. – №411. – С.130–153.
23. Белоусов, Б.Н. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет / Б.Н. Белоусов, С.Д. Попов. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2006. – 728 с.
24. Беляков, В.В. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения / Под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: Изд-во. ТАЛАН, 2004. – 951 с.
25. Бидерман, В.Л. Автомобильные шины / В.Л. Бидерман, Р.Л. Гуслицер, С.П. Захаров и др. – М.: Госхимиздат, 1963. – 384 с.
26. Бируля, А.И. Исследование взаимодействия колес с грунтом как основа оценки проходимости / А.И. Бируля // Проблемы повышения проходимости колесных машин. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 111–118.
27. Василенко, П.В. К теории качения колеса со следом / П.В. Василенко // Сельхозмашины. – 1950. – № 9. – С. 30–37.
28. Васильченков, В.Ф. Военная автомобильная техника. Книга вторая. Военные автомобили и гусеничные машины. Теория эксплуатационных свойств / В.Ф. Васильченков; под общ. ред. М.А. Невдаха. – Рязань: Воениздат МО РФ – ООО ПК «Тигель», 2004. – 432 с.
29. Веденяпин, В.В. Общая методика оценки экспериментального исследования и обработки опытных данных / В.В. Веденяпин. – М.: Наука, 1967. – 159 с.
30. Вирабов, Р.В. Исследование влияния параметров автомобиля на сопротивление его движению по деформируемому грунту / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев, В.М. Петрова и др. // Известия вузов. – 1988. – № 1. – С. 97–102.
31. Вирабов, Р.В. Исследование влияния параметров автомобиля на сопротивление его движению по дороге с твердым покрытием / Р.В. Вирабов, А.Н. Мамаев, В.Л. Медокс и др. // Вестник машиностроения. – 1986. – № 4. – С. 48–51.

32. Водяник, И.И. Работа колеса при многократных проходах по одному следу / И.И. Водяник // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 5. – С. 34–36.
33. Вольская, Н.С. Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / Н.С. Вольская. – М., 2008. – 370 с.
34. Вонг, Дж. Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг. – Пер. с англ. А.И. Аксенова. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
35. Горелов, В.А. Научные методы повышения безопасности и энергоэффективности движения многоосных колесных транспортных комплексов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / В.А. Горелов. – М., 2012. – 336 с.
36. Герминтерн, В.И. Методы оптимального проектирования / В.И. Герминтерн, Б.М. Каган. – М.: Энергия, 1980. – 160 с.
37. Горячкин, В.П. Теория колеса. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – Т. 2. – 720 с.
38. ГОСТ 16350–80 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 94 с.
39. ГОСТ 21624–81 Система технического обслуживания и ремонта автомобильной техники. Требования к эксплуатационной технологичности и ремонтнопригодности изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 64 с.
40. ГОСТ 52398–2005 Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. – М.: Стандартинформ, 2006. – 3 с.
41. ГОСТ РВ 5204–2003 Автомобили многоцелевого назначения. Параметры проходимости и методы их определения. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 76 с.
42. Гмурман, В.С. Теория вероятности и математическая статистика / В.С. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1972. – 324 с.
43. Гринценко, Д.В. Моделирование дорожного воздействия на транспортные средства / Д.В. Гринценко, Ю.Н. Нуждов, Р.В. Шаповалов. – М.: Воениздат, 1991. – 231с.

44. Гришкевич, А.И. Автомобили: Теория / А.И. Гришкевич. – Минск: Высшая школа, 1986. – 208 с.
45. Гуськов, В.В. Тракторы: Теория / В.В. Гуськов. – М.: Машиностроение, 1988. – 375с.
46. Дэннис, Дж., Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений / Дж. Дэннис. – Пер. с англ. под ред. Р. Шнабель. – М.: Мир, 1988. – 440 с.
47. Егоров, А.И. Исследование влияния распределения нормальных нагрузок по осям полноприводного автомобиля на некоторые показатели его проходимости по деформируемым грунтам: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / А.И. Егоров. – М., 1978. – 202 с.
48. Егоров, А.И. О рациональном распределении веса по мостам полноприводного автомобиля при движении по деформируемым грунтам / А.И. Егоров, М.П. Чистов, С.А. Шуклин. // Автомобильная промышленность. – 1976. – № 10. – С. 8–10.
49. Желиговский, В.А. Колея и механика качения колеса. Сборник трудов по земледельческой механике. – М.: Сельхозиздат, 1956. – Т. 1. – С. 419–450.
50. Забавников, Н.А. Определение сил моментов для случая взаимодействия прямолинейного движущегося колеса с деформируемым грунтом / Н.А.Забавников, В.Н. Наумов, Ю.А. Рождественский и др. // Известия вузов. – 1975. – №3. – С. 121–126.
51. Забавников, Н.А. Сравнение зависимостей давление-деформация грунта / Н.А. Забавников, А.Ф. Батанов, А.В. Мирошниченко. // Труды МВТУ. – 1982. – № 390. – С. 72–80.
52. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
53. Зимелев, Г.В. Проблемы проходимости колесных машин и основные направления их решения / Г.В. Зимелев // Проблемы повышения проходимости колесных машин: сборник трудов. – М.: АН СССР, 1959. – С. 4–8.

54. Исследование возможностей повышения подвижности АМН путем оперативной адаптации колесного движителя к дорожным условиям: отчет о НИР / Усиков В.Ю. – Омск: Омский автобронетанковый инженерный институт, 2013. – 93 с.
55. Кацыгин, В.В. Влияние конструктивных параметров на тягово-экономические показатели тракторов 4x4 / В.В. Кацыгин, Г.С. Горин, А.А. Зенькович и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 1982. – № 11. – С. 9–12.
56. Кацыгин, В.В. Воздействия колесных ходовых систем на почву / В.В. Кацыгин, А.Н. Орда. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981. – №4. – С. 41–44.
57. Кацыгин, Г.С. Перспективные мобильные энергетические средства (МЭС) для сельскохозяйственного производства / В.В. Кацыгин, Г.С. Горин, А.А. Зенькова. – Минск: Наука и техника, 1982. – 272 с.
58. Келлер, А.В. Исследование некоторых вопросов качения эластичного колеса / А.В. Келлер // Материалы международной научно-технической конференции «Многоцелевые гусеничные и колесные машины: актуальные проблемы теории и практики, научная работа и образование». – Челябинск: Изд-во. ЮУрГУ, 2004. – С. 41–45.
59. Келлер, А.В. К определению рациональных режимов использования полноприводного автомобиля / А.В. Келлер // Материалы межрегиональной научно-технической конференции «Многоцелевые гусеничные и колесные машины: разработка, производство, боевая эффективность, наука и образование». Часть 2. – Омск: ОТИИ, 2002. – С. 27–31.
60. Келлер, А.В. Комплексная оценка эффективности методов распределения мощности в механических трансмиссиях. /А.В. Келлер, И.А. Мурог, В.Ю. Усиков и др. //Автомобильная промышленность. – 2013. – № 4. – С. 14–17.
61. Келлер, А.В. Оптимизация распределения мощности между движителями колесных машин / А.В. Келлер // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – №11. – С. 25–28.
62. Келлер, А.В. Система распределения мощности и методы ее реализации в полноприводных армейских автомобилях: дис. ... д-ра. техн. наук: 20.02.14 / А.В. Келлер. – Бронницы, 2010. – 413 с.

63. Келлер, А.В. Повышение эффективности колесных машин на основе оптимального распределения мощности между ведущими колесами / А.В. Келлер, Г.Д. Драгунов, С.Н. Марченко // Механика и процессы управления. Том 2. Проблемы машиностроения. Труды XXXIV Уральского семинара. – Екатеринбург: РАН, 2004. – С. 126–136.
64. Келлер, А.В. Принципы и методы распределения мощности между ведущими колесами автомобильных базовых шасси / А.В. Келлер, И.А. Мурог. – Челябинск, 2009. – 218 с.
65. Келлер, А.В. Теоретические основы оптимизации распределения мощности в колесных машинах / А.В. Келлер, Г.Д. Драгунов // Вестник ЮУрГУ. – Челябинск: Изд-во. ЮУрГУ, 2004. – №5(№34). – С. 90–94.
66. Котиев, Г.О. Моделирование прямолинейного движения полноприводной машины по несвязным грунтам / Г.О. Котиев, В.А. Горелов // Труды «МАМИ». Автомобили и двигатели. – 2009. – №241. – С. 25–29.
67. Котиев, Г.О. Повышение проходимости автомобиля за счет рационального распределения потоков мощности по колесам / Г.О. Котиев, И.В. Серебрянный // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Машиностроение – 2009. – Специальный выпуск – С. 193–201.
68. Кошарный, Н.Ф. Влияние параметров рисунка протектора на сцепление шин с деформирующимся грунтом / Н.Ф. Кошарный // Конструкции автомобилей. – 1977. – Выпуск 1. – С. 37–44.
69. Кошарный, Н.Ф. Некоторые закономерности динамики взаимодействия колеса с грунтом / Н.Ф. Кошарный // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 1. – С.16–23.
70. Кошарный, Н.Ф. Оценка несущей способности слабых оснований / Н.Ф. Кошарный // Автомобильные дороги и дорожное строительство. – 1978. – Выпуск 23. – С. 85–91.
71. Кошарный, Н.Ф. Техничко-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости / Н.Ф. Кошарный. – Киев: Вища школа, 1981. – 208 с.

72. Ксеневиц, И.П. Ходовая система «почва-урожай» / И.П. Ксеневиц, В.А. Скотникое, М.И. Ляско. – М.: Агропромиздат, 1985. – 302 с.
73. Кузьменко В.А. Исследование тягово-сцепных свойств и обоснование выбора параметров ведущих и ведомых колес тракторов и сельхозмашин: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.03 / В.А. Кузьменко. – Минск, 1963. – 147 с.
74. Кутьков, Г.М. Теория трактора и автомобиля: учебное пособие для вузов / Г.М. Кутьков. – М.: Колос, 1996. – 287 с.
75. Лазарев, В.В., Сеницын, С.С. Анализ процесса колеобразования при качении пневматического колеса по деформируемому грунту / В.В. Лазарев, С.С. Сеницын // Известия вузов. – 1983. – № 5. – С. 84–87.
76. Ларин, В.В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / В.В. Ларин. – М., 2007. – 419 с.
77. Лецкий, Э.А. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Э.А. Лецкий, К.Р. Хартман, В.Ф. Шеффер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
78. Лильбок, А.Э. Методы оценки и пути улучшения показателей опорной проходимости полноприводных автомобилей: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.03 / А.Э Лильбок. – М., 1989. – 200 с.
79. Литвинов, А.С., Фаробин, Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
80. Ляско, М.И. Влияние распределения нагрузки между осями колесной повозки на сопротивление качению / М.И. Ляско // Известия вузов. – 1972. – №1. – С. 68–73.
81. Наумов, А.Н., Математическая модель криволинейного движения эластичного колеса по деформируемому грунту / А.Н. Наумов, М.П. Чистов // ААИ. – 2007. – №6 (47). – С. 19–23.

82. Наумов, А.Н. Оценка влияния конструктивных и эксплуатационных параметров автомобилей на показатели их опорной проходимости: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / А.Н. Наумов. – М., 2007. – 153 с.

83. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

84. Норенков, И.Н. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем / И.Н. Норенков. – М.: Высшая школа, 1980. – 311 с.

85. Орда, А.Н. Исследование механики колееобразования и уплотнения почвы колесными движителями и обоснование требований к многоосным ходовым системам: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / А.Н. Орда. – Минск, 1978. – 16 с.

86. Петрушов, В.А. Автомобили и автопоезда: Новые технологии исследования сопротивлений качения и воздуха / В.А. Петрушов. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2008. – 352 с.

87. Петрушов, В.А. Мощностной баланс автомобиля / В.А. Петрушов, В.В. Московкин, А.Н. Евграфов; под общ. ред. В.А. Петрушова. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.

88. Петрушов, В.А. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В.А. Петрушов, С.А. Шуклин, В.В. Московкин – М.: Машиностроение, 1975. – 184 с.

89. Пирковский, Ю.В. Сопротивление качению многоприводных автомобилей и автопоездов по твердым дорогам и деформируемому грунту: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.05.03 / Ю.В. Пирковский. – М., 1976. – 301 с.

90. Пирковский, Ю.В. Затраты мощности на колееобразование при качении жесткого колеса по деформируемому грунту / Ю.В. Пирковский, М.П. Чистов // Труды. Научный автотранспортный институт – 1971. – №131. – С.73–78.

91. Пирковский, Ю.В. Об изменении некоторых параметров грунта при повторных проходах колеса по одной колее / Ю.В. Пирковский, М.П. Чистов // Труды Центр. н.-и. автомоб. и автотранспорт. института. – 1975. – Вып. 154. – С. 21–26.

92. Пирковский, Ю.В., Чистов М.П. Расчетное определение энергетических параметров, характеризующих качение колеса по деформируемому грунту / Ю.В. Пирковский, М.П. Чистов // Известия вузов. – 1972. – № 9. – С. 98–104.

93. Пирковский, Ю.В., Шухман, С.Б. Снижение затрат мощности на преодоление сопротивления качению / Ю.В. Пирковский, С.Б. Шухман // Автомобильная промышленность. – 1987. – № 5. – С. 15–16.

94. Пирковский, Ю.В. Снижение сопротивления качению путем оптимального распределения крутящего момента и массы автомобиля по осям / Ю.В. Пирковский, С.Б. Шухман // Полигонные испытания, исследования и совершенствование автомобилей: Сб. тр. Центр, н.-и. автомоб. и автотор инсттута. – 1985. – С. 58–67.

95. Пирковский, Ю.В. Теория движения полноприводного автомобиля (прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси) / Ю.В. Пирковский, С.Б. Шухман. – М.: Академия проблем качества Российской Федерации. Отделение спецтехники и конверсии, 1999. – 151 с.

96. Планетоходы. / Под ред. А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.

97. Платонов, В.Ф. Полноприводные автомобили / В.Ф. Платонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

98. Полетаев, А.Ф. Качение ведущего колеса / А.Ф. Полетаев // Тракторы и сельхозмашины. – 1964. – № 1. – С. 10–11.

99. Полетаев, А.Ф. Несущая способность пневматических шин при качении по деформируемой поверхности / А.Ф. Полетаев // Повышение надежности, долговечности и тяговосцепных свойств тракторов: Межвуз. сб. научн. тр. – М., 1983. – С. 5–40.

100. Полетаев, А.Ф. Основы теории сопротивления, качению и тяги жесткого колеса по деформируемому основанию / А.Ф. Полетаев. – М.: Машиностроение, 1971. – 69 с.

101. Полетаев, А.Ф. Тяговые свойства колесных тракторов различных конструктивных схем / А.Ф. Полетаев // Вопросы надежности, долговечности и повышения тяговых качеств трактора: Межвуз. сб. научн. тр. – М., 1985. – С. 4–39.
102. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко; 4-е изд. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
103. Рождественский, Ю.Л. Математическая модель взаимодействия металлоупругого колеса с уплотняющимся грунтом / Ю.Л. Рождественский, В.Н. Наумов // Труды МВТУ. – 1980. – № 339. – С. 84–111.
104. Рождественский, Ю.Л. Определение равновесного контакта упругого колеса с грунтом / Ю.Л. Рождественский, В.Н. Наумов // Известия вузов. – 1986. – № 6. – С. 93–97.
105. Ромакин, М.И. Математический аппарат оптимизационных задач / М.И. Ромакин. – М.: Статистика, 1975. – 112 с.
106. Сапожников, В.В. Метод расчета параметров проходимости многоколесных транспортных средств большой грузоподъемности: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / В.В. Сапожников. – М., 1986. – 23 с.
107. Скойбеда, А.Т. Автоматизация ходовых систем колесных машин / А.Т. Скойбеда. – Минск: Наука и техника, 1979. – 280 с.
108. Смирнов, Г.А. Теория движения колесных машин / Г.А. Смирнов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
109. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
110. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. – М.: Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.
111. Ульянов, Н.А. Колесные движители строительных и дорожных машин / Н.А. Ульянов. – М.: Машгиз, 1982. – 279 с.
112. Усиков, В.Ю. Анализ эффективности способов повышения быстродействия систем регулирования давления воздуха в шинах / В.Ю. Усиков,

А.В. Келлер, С.В. Ушнурцев // материалы Всероссийской 65-й научно-технической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием). Книга 2. – Омск: СибАДИ, 2011. – С. 158–163.

113. Усиков, В.Ю. Аспекты математического моделирования процесса регулирования давления воздуха в шинах / В.Ю. Усиков // Материалы 67-й научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Теория, методы проектирования машин и процессов в строительстве». Книга 3. – Омск: СибАДИ, 2013. – С. 96–99.

114. Усиков, В.Ю. Выбор оптимальных режимов использования полного привода в трансмиссиях бронированных колесных машин / А.В. Келлер, С.В. Ушнурцев, В.Ю. Усиков // Вестник Академии военных наук. – 2012. – №3 (40). – С. 62–66.

115. Усиков, В.Ю. Математическая модель расчета маршрута движения колесных машин / В.Ю. Усиков, С.В. Ушнурцев // Омский научный вестник. – 2013. – №2 (120). – С. 158–161.

116. Усиков, В.Ю. Метод комбинированного управления распределением мощности между ведущими колесами автомобильного базового шасси с прогнозированием возмущений / С.В. Ушнурцев, А.В. Келлер, В.Ю. Усиков // Омский научный вестник. – 2012. – №3 (113). – С. 180–184.

117. Усиков, В.Ю. Метод управления распределением мощности между ведущими колесами автомобиля многоцелевого назначения по взаимному отклонению кинематических и силовых факторов / С.В. Ушнурцев, А.В. Келлер, В.Ю. Усиков // Омский Научный Вестник. – 2012. – №1 (107). – С. 159–162.

118. Усиков, В.Ю. Метод частичного решения при распределении мощности между ведущими колесами автомобильных базовых шасси / В.Ю. Усиков, А.В. Келлер, С.В. Ушнурцев // Омский Научный Вестник. – 2012. – №2 (110). – С. 129–132.

119. Усиков, В.Ю. Методика разработки алгоритма ограничения буксования ведущих колес автомобиля многоцелевого назначения на основе нечеткого контроллера и подбора аппаратного обеспечения для его обработки / С.В. Ушнур-

цев, А.В. Келлер, В.Ю. Усиков // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин». Книга 1. – Омск: изд-во ОмГТУ, 2012. – С. 60–63.

120. Усиков, В.Ю. О повышении эффективности систем регулирования давления воздуха в шинах / В.Ю. Усиков, С.В. Ушнурцев, В.П. Степанов // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования». Книга 2. – Омск: СибАДИ, 2012. – С. 272–275.

121. Усиков, В.Ю. Обоснование параметров колесного движителя транспортного средства / В.Н. Тарасов, В.В. Дегтярь, В.Ю. Усиков // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования». Книга 2. – Омск: СибАДИ, 2012. – С. 165–169.

122. Усиков, В.Ю. Обоснование путей повышения подвижности многоцелевых колесных машин / А.В. Келлер, Н.А. Карпов, Д.В. Шафиков, В.Ю. Усиков, С.В. Ушнурцев // Материалы 77-ой Международной научно-технической конференции ААИ «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров». Книга 1. – М.: МГТУ «МАМИ», 2012. – С. 180–185.

123. Усиков, В.Ю. Определение величины критического буксования эластичного колеса. / В.Ю. Усиков, А.В. Келлер, С.В. Ушнурцев // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. – 2013. – № 23. – С. 191–194.

124. Усиков, В.Ю. Определение рациональных режимов использования полного привода для бронированных колесных машин / С.В. Ушнурцев, В.Ю. Усиков // Межвузовский сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. Вып. 9. – Омск: СибАДИ, 2012. – С. 276–280.

125. Усиков, В.Ю. Повышение проходимости автомобилей многоцелевого назначения путем совершенствования конструкции системы регулирования дав-

ления воздуха в шинах / В.Ю. Усиков, С.В. Ушнурцев // Материалы 67-й научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Теория, методы проектирования машин и процессов в строительстве». Книга 3. – Омск: СибАДИ, 2013. – С. 100–104.

126. Усиков, В.Ю. Повышение эффективности систем регулирования давления воздуха в шинах автомобилей многоцелевого назначения. / В.Ю. Усиков, В.В. Дегтярь, А.А. Новоселов, С.В. Ушнурцев, А.В. Келлер // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. – 2012. – № 15. – С. 12–14.

127. Усиков, В.Ю. Применение межколесного дифференциала с муфтой свободного хода на автомобилях многоцелевого назначения / С.В. Ушнурцев, А.В. Келлер, В.Ю. Усиков // Сборник научных трудов по итогам 15-й международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении». Вып. 15. – Брянск: изд-во БГИТА, 2012. – С. 249–252.

128. Усиков, В.Ю. Принцип модифицированного регулирования буксования ведущих колес автомобильного базового шасси / С.В. Ушнурцев, В.Р. Эдигаров, В.Ю. Усиков и др. // материалы Всероссийской 65-й научно-технической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием). Книга 2. – Омск: СибАДИ, 2011. – С. 26–30.

129. Усиков, В.Ю. Теоретическое обоснование выбора передаточного числа межосевого дифференциала автомобиля многоцелевого назначения / С.В. Ушнурцев, А.В. Келлер, В.Ю. Усиков // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования». Книга 2. – Омск: СибАДИ, 2012. – С. 275–279.

130. Усиков, В.Ю. Уточнение математической модели прямолинейного качения одиночного эластичного колеса по деформируемому грунту / В.Ю. Усиков, А.В. Келлер, С.В. Ушнурцев // Вестник Академии военных наук. – 2013. – № 4 (45). – С. 169–173.

131. Хабатов, Р.Ш. Моделирование уплотнения почвы колесными движителями / Р.Ш. Хабатов, Д.И. Золотаревская, В.Т. Ходыкин // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. – № 1. – С. 6–9.

132. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – 3-е изд., дополн. – М.: Высшая школа, 1979. – 272 с.

133. Черкасов, И.И. Вдавливание жесткого штампа в плотный и рыхлый песок / И.И. Черкасов, К.И. Ибрагимов – Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1971. – № 4. – С. 13–14.

134. Чистов, М.П. Исследование сопротивления качению при движении полноприводного автомобиля по деформируемому грунту: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / М.П. Чистов. – М., 1971. – 136 с.

135. Чистов, М.П. Математическое описание качения деформируемого колеса по деформируемому грунту / М.П. Чистов // Известия вузов. – 1986. – № 4. – С. 76–82.

136. Чистов, М.П., Наумов, А.Н. Математическая модель качения эластичного колеса по деформируемому грунту / М.П. Чистов, А.Н. Наумов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2007. – №2 (4). – С. 83–89.

137. Чичекин, И.В. Разработка пространственных динамических моделей колесных машин для анализа проходимости при движении по неровным грунтовыми поверхностям: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06, 05.05.03 / И.В. Чичекин. – М., 2010. – 257 с.

138. Чудаков, Е.А. Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. – 3-е изд, перераб. и доп. – М.: Машгиз, 1950. – 344 с.

139. Шарипов, В.М. Конструирование и расчет тракторов. Учебник для вузов / В.М. Шарипов. – М.: Машиностроение, 2004. – 592 с.

140. Шуклин, С.А. Проблема повышения эффективности многоприводных грузовых автомобилей и пути ее решения: автореферат дис. ... д-ра. техн. наук: 05.05.03 / С.А. Шуклин. – М., 1980. – 32 с.

141. Шухман, С.Б. Влияние распределения массы по мостам полноприводного автомобиля с колесной формулой 4x4 на сопротивление движению /

С.Б. Шухман // Надежность и активная безопасность автомобиля: Межвуз. сб. научн. трудов. – М., 1985. – С. 251–256.

142. Allen, R.W., Rosenthal, T. J., Chrstos, J. P. A Vehicle. Dynamics Tire Model for Both Pavement and Off-Road Conditions, in SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 1997.

143. Bekker, M.G. Accomplishments and future tasks in off-road transportation. – J. of Terramechanics, 1974, vol. 11, № 2, pp 11 to 30.

144. Bernard, J., Clover, C. Tire Modeling for Low-speed and High-Speed Calculations. SAE 950311, 1995.

145. Isermann, R Fahrndynamik-Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik- ATZ/VNZ - Fachbuch Vieweg+Teubner, 2006.

146. Gee-Clough, D. The Bekker theory of rolling resistance amended to take account of skid and deep-sinkage. – Journal of Terramechanics, 1976, Vol. 13, №2, P. 87–105.

147. Gee-Clough, D. The effect to wheel with on the rolling resistance of rigid wheels in sand. – J. of Terramechanics, 1979, Vol. 15, № 4, P. 161–184.

148. Gent A.N., Walter, J.D. The Pneumatic Tire. Washington, D.C. August, 2005.

149. Genta, G. Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation vol. 43. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2003.

150. Hegedus, E. Pressure distribution under rigid wheels. A.S.A.E. Transactions, Vol. 8, №3, 1965.

151. Hetherington, J.G. Astudy of the skidding characteristics of towed wheels. – Journal of Terramechanics, 1979, Vol. 16, № 3, pp: 129 to 137.

152. Hetherington, J.G. Littleton, J. The rolling resistance of towed, rigid wheels in sang. – Journal of Terramechanics, 1978, Vol. 15, № 2, pp: 95 to 105.

153. Hovland, HJ. Mechanics of wheels - soil interaction. – University of California. Berkeley. Space Science Laboratory, 1973, s.14, issue 23, pp. 1 to 136.

154. Hovland, H.J., Mitchell, J.K. Model studies of the failure mechanic associated with a sphere rolling down a soil slope. – Journal of Terramechanics, 1972, Vol. 9, № 1, P. 37–50.
155. Janosi, Z., Hanamoto, B. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. - Jnt. Conf. On the mechanics of S-V Systems, 1-st, 1961, Report № 44.
156. Jo-Yung-Wong, J., Reece, A.R. Soil failure beneath rigid wheels. Proc. 2-nd Int.Conf.Jnt.Soc. For Terrain Vehicle Systems-University of Toronto Press, 1966, pp.425 to 445.
157. Melzer, K.-J. Power requirements for wheels operating in sand. – Journal of Terramechanics, 1976, Vol. 13, №2, pp. 75 to 85.
158. Morrison, M., Romano, R., Reid, A., Gorsich, D. High-Frequency Terrain Content and Surface Interactions for Off-Road Simulations. SAE, 2004.
159. Muro, T., O'Brien, J., Terramechanics: Land Locomotion Mechanics. Lisse: A.A. Balkema, 2004.
160. Pytka, J.A. Dynamics of Wheel–Soil Systems. A Soil Stress and Deformation-Based Approach. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2013.
161. Reece, A.R. The shape of the form tractor // Proc. Inst. Mech. Engn. - 1969-1970. – Vol.184, Part 3Q. – P. 45-77.
162. Schuring, D. The energy loss of a wheel. - Proc. Of the 2-nd Jnt. Gonf. of Jnt. Society for Terrain - Vehicle Systems - Toronto, 1966, pp. 391 to 424.
163. Shoop, S. A. Finite Element Modeling of Tire-Terrain Interaction. PhD Thesis, University of Michigan, 2001.
164. Shmulevich, I. State of the art modeling of soil–tillage interaction using discrete element method. Soil and Tillage Research, 2010, 111(1), pp. 41-53.
165. Sitkei, G. The bulldozing resistance of towed rigid whells in loose sand. – Journal of Terramechanics, 1966, vol. 3, № 2, pp. 25 to 37.
166. Swanson, G.D. Studies of dual and tandem rigid wheel performance in sand. – Journal of Terramechanics, 1973, Vol. 10, № 2, P. 9–47.

167. Vantsevich, V.V. All-Wheel Drive Mechatronic Systems: Principle of Wheel Power Management. SAE, 2006
168. Vantsevich, V.V., Amani L. Control of the vehicle's running abilities is a pre-condition for designing wheel drive systems. ASME Annual Congress, 2001.
169. Vantsevich V.V. Inverse Wheel Dynamics. IMECE2006-13787. ASME Congress, November 5-10, 2006, Chicago, Illinois.
170. Vantsevich, V.V., Kharytonchyk, S.V., Happawana, G.S., Nwokah, O.D.I. Basis for Logical Control of Circumferential Wheel Forces of Highway Trucks for Improving Traction and Fuel Efficiency. SAE Technical paper series – 982790, Int. Truck & Bus Meeting & Exposition, Indianapolis, Indiana, 1998, November 16 - 18.
171. Vantsevich V.V. Multi-Wheel Drive Vehicle Energy/Fuel Efficiency and Traction Performance: Objective Function Analysis, 2007, Journal of Terramechanics, 27p. (accepted for publication).
172. Vantsevich V.V. Vehicle dynamics as the second dynamics problem. International Journal of Vehicle Design (UK), 2001, vol. 25, No 3, pp. 164-169.
173. Wills, B.M.D., Barret, F.M., Shaw, GJ. An investigation into rolling resistance theories for tared rigid wheels. – Journal of terramechanics, 1965, Vol. 2, № 1, pp. 24 to 53.
174. Wilson, N.E., Krzywicki, H.R. Deformation in a peat soil under dynamic load. – Journal of Terramechanics, 1965, Vol. 2, № 1, pp. 54 to 62.
175. Wulfsohn, D., Upadhyaya, S. K. Prediction of traction and soil compaction using three-dimensional soil-tyre contact profile. Journal of Terramechanics, 1992, 29(6), pp. 541-564.
176. Yoon, S. A Study on Terrain-Surface Modeling and Searing Algorithms for Real-time Simulation of Off-road Vehicles. Vehicle System Dynamics, 2003, 39(5), pp. 353-363.
177. Wong, J.Y. Data processing methodology in the characterization of the mechanical properties of terrain. – Journal of Terramechanics, 1980, vol. 17, № 1, pp 13 to 41.

178. Wong, J.Y. Optimization of the tractive performance of four wheel-drive off-road vehicles // SAE Transactions. - 1970. - Vol. 79, Pap. 700723. – P. 23-65.

179. Wong, J.Y., Reece, A.R. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses. – Journal of Terramechanics, 1967, Vol.4, № 2, pp. 7 to 25.

180. Youssef, A.-F.A., Ali, G.A. Determination of soil parameters using plume test. – Journal of Terramechanics, 1982, Vol. 19, № 2, pp. 129 to 147.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Математическая модель в системе Matlab в пакете Simulink

1. Исходные данные:

$m_a; m_{ki}; J_{ki}; \dot{V}_{X_c}; g; \alpha; \varphi_i; \mu; c_l; L; B; k_{HPwi}; C_{нодв}; B_{нодв}; X_{ki}; Q_{ki}; \varphi_{max}; S_0; P_{wi}; n_i; k_0...k_7; J_i; J_e.$

2. Система уравнений:

$$m_a \dot{V}_{X_c} = 2 \sum_{i=1}^n P_{X_i} - (m_a g [f \cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)] + P_{KP} + P_e + \sum P_{mi}),$$

$$J_{k_i} \dot{\omega}_{k_i} = M_{k_i} - (1 - S_{\sigma_i}) (f_{w_i} + \varphi_i) R_{Z_i} r_{k_0},$$

$$m_{k_i} \dot{V}_{X_{k_i}} = \varphi_i R_{z_i} - P_{X_i} - m_{k_i} g \sin(\alpha + \beta),$$

$$\beta = \arcsin \frac{H_n - H_1}{L},$$

$$H_i = \left(\frac{2R_{z_i}}{k_{HPwi} c_i B \sqrt{2r_k} \left(2 - \frac{13}{15} \mu + \frac{1}{5} \mu^2 \right)} \right)^{1/\mu+0.5},$$

$$P_{fwi} = f_{w_i} \cdot R_{Z_i},$$

$$f_{w0i} = F(P_{wi}; R_{zi}; n_i),$$

$$f_{w0i} = (k_0 + k_1 P_{wi} + k_2 R_{zi} + k_3 n_i + k_4 P_{wi} R_{zi} + k_5 P_{wi} n_i + k_6 R_{zi} n_i + k_7 P_{wi} R_{zi} n_i)^i$$

$$R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} - \frac{G_a \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0,$$

$$R_{z2} - R_{z3} = 0,$$

$$G_a \cos(\alpha + \beta) X_{ki} - 2(M_{k1} + M_{k2} + M_{k3}) + P_{KP} Z_{TCY} - 4R_{z2} \left(L - \frac{L_{3-4}}{2} \right) = 0.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_e = \frac{\dot{\omega}_1 + 2\dot{\omega}_{2-3}}{3} \\ J_e \dot{\omega}_e = M_e - M_{\mathcal{D}} \\ J_1 \dot{\omega}_1 = \frac{M_{\mathcal{D}}}{3} - M_{k1} \\ J_{2-3} \dot{\omega}_2 = \frac{2M_{\mathcal{D}}}{3} - M_{k2-3} \end{array} \right. ,$$

$$\dot{\omega}_{2-3} = \frac{\dot{\omega}_2 - \dot{\omega}_3}{2},$$

$$\frac{1}{2} M_{k2-3} = M_{k2} = M_{k3}.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_e \dot{\omega}_e = M_e - M_{\bar{\sigma}} \\ M_{\bar{\sigma}} = M_{k1} + M_{k2-3} \\ \dot{\omega}_e = \dot{\omega}_1 = \dot{\omega}_{2-3} \end{array} \right. ,$$

$$\dot{\omega}_{2-3} = \dot{\omega}_2 = \dot{\omega}_3,$$

$$M_{k2-3} = M_{k2} + M_{k3}.$$

3. Начальные условия:

$$\dot{V}_X(t_0) = 0; \dot{V}_K(t_0) = 0; \dot{\omega}_i = 0; V(t_0) = 7 \text{ м/с}.$$

4. Рассчитываемые переменные:

$$\omega_e; M_{ki}; M_{k2-3}; M_e; M_{\bar{\sigma}}; \dot{\omega}_i; \dot{\omega}_{2-3}; \dot{\omega}_e; c_i; V_{XC}; \beta; \dot{V} X_{ki}; \omega_{Ki}; \dot{\omega}_{ki}; \varphi_i; f_{wi}; f_{w0i};$$

$$R_{zi}; S_{\bar{\sigma}}; M_{fki}; H_n; H_1; H_i.$$

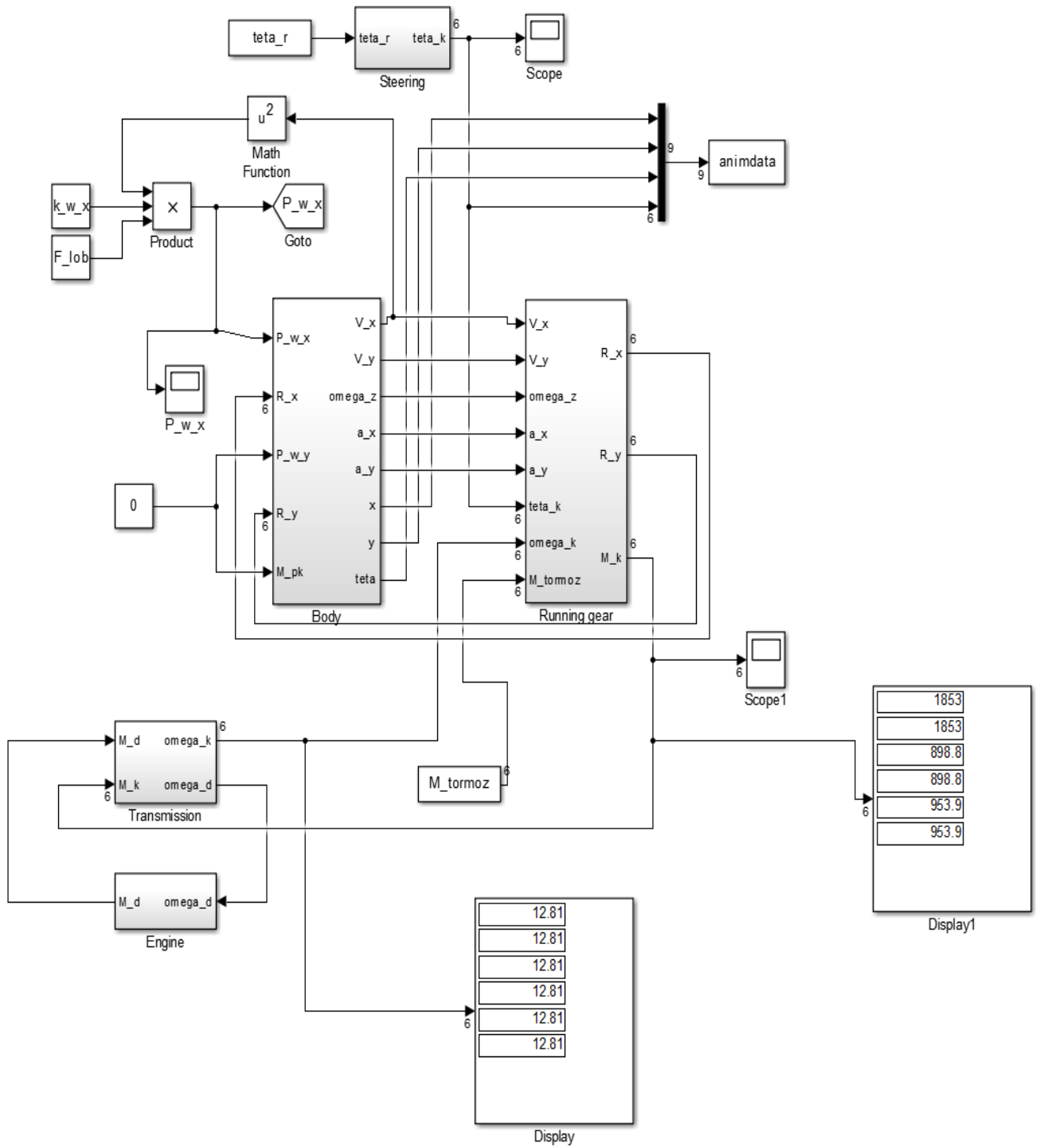


Рисунок А.1 – Блок-схема математической модели

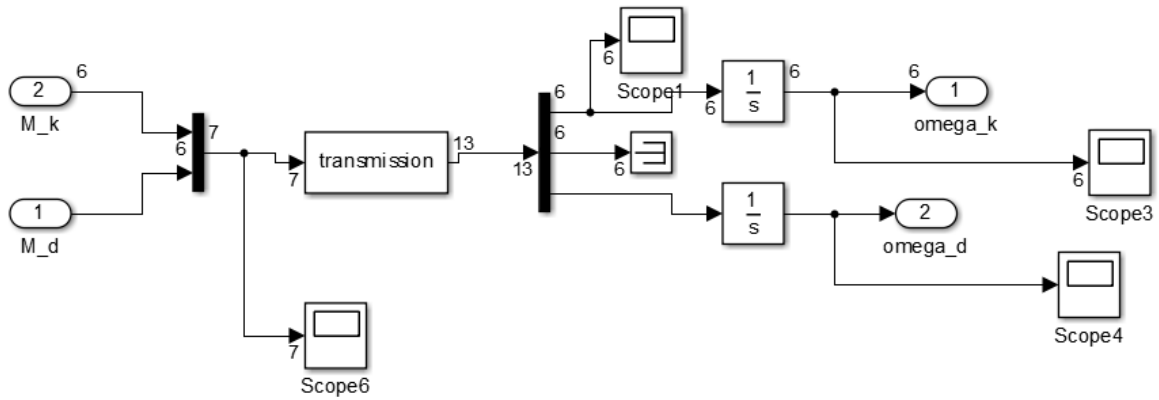


Рисунок А.2 – Блок описания работы трансмиссии

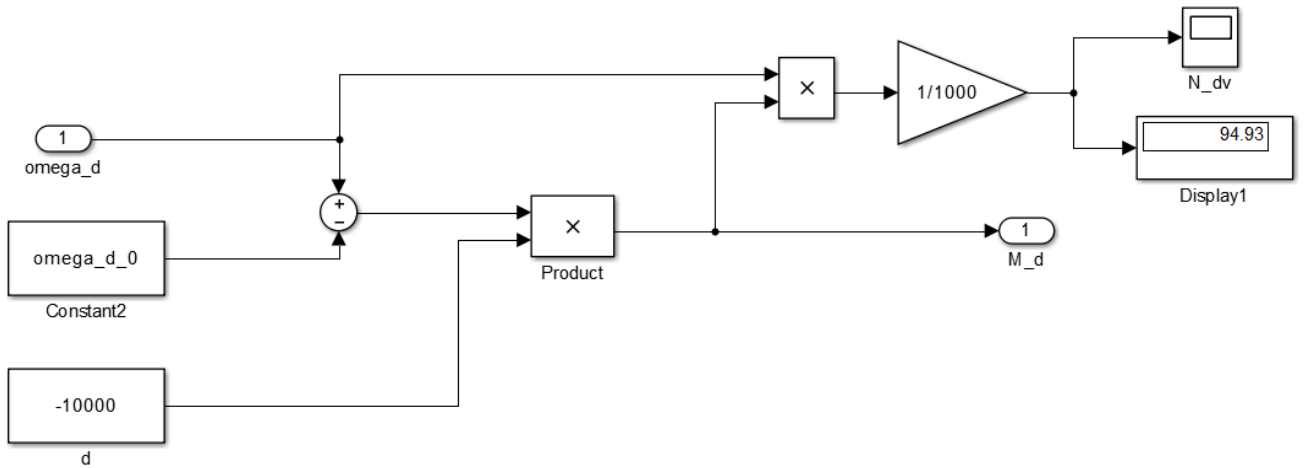


Рисунок А.3 – Блок описания работы двигателя

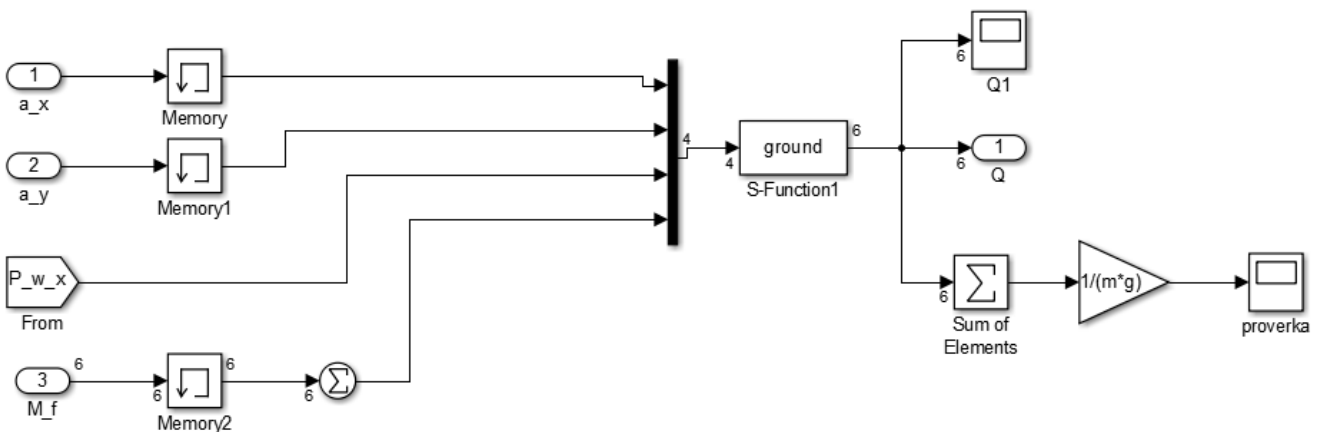


Рисунок А.4 – Блок описания грунтового основания опорной поверхности

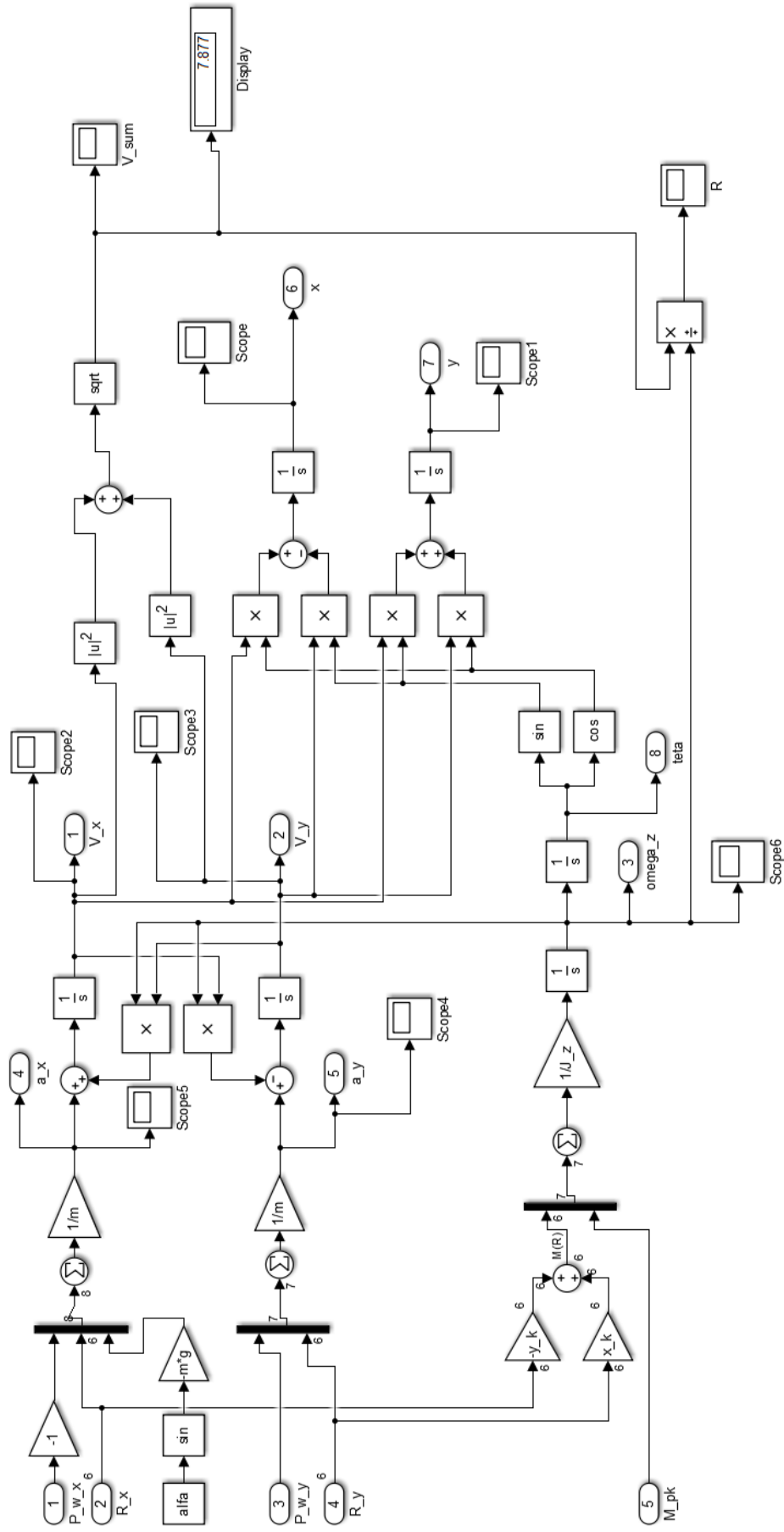


Рисунок А.5 – Блок описания внешней динамики автомобиля

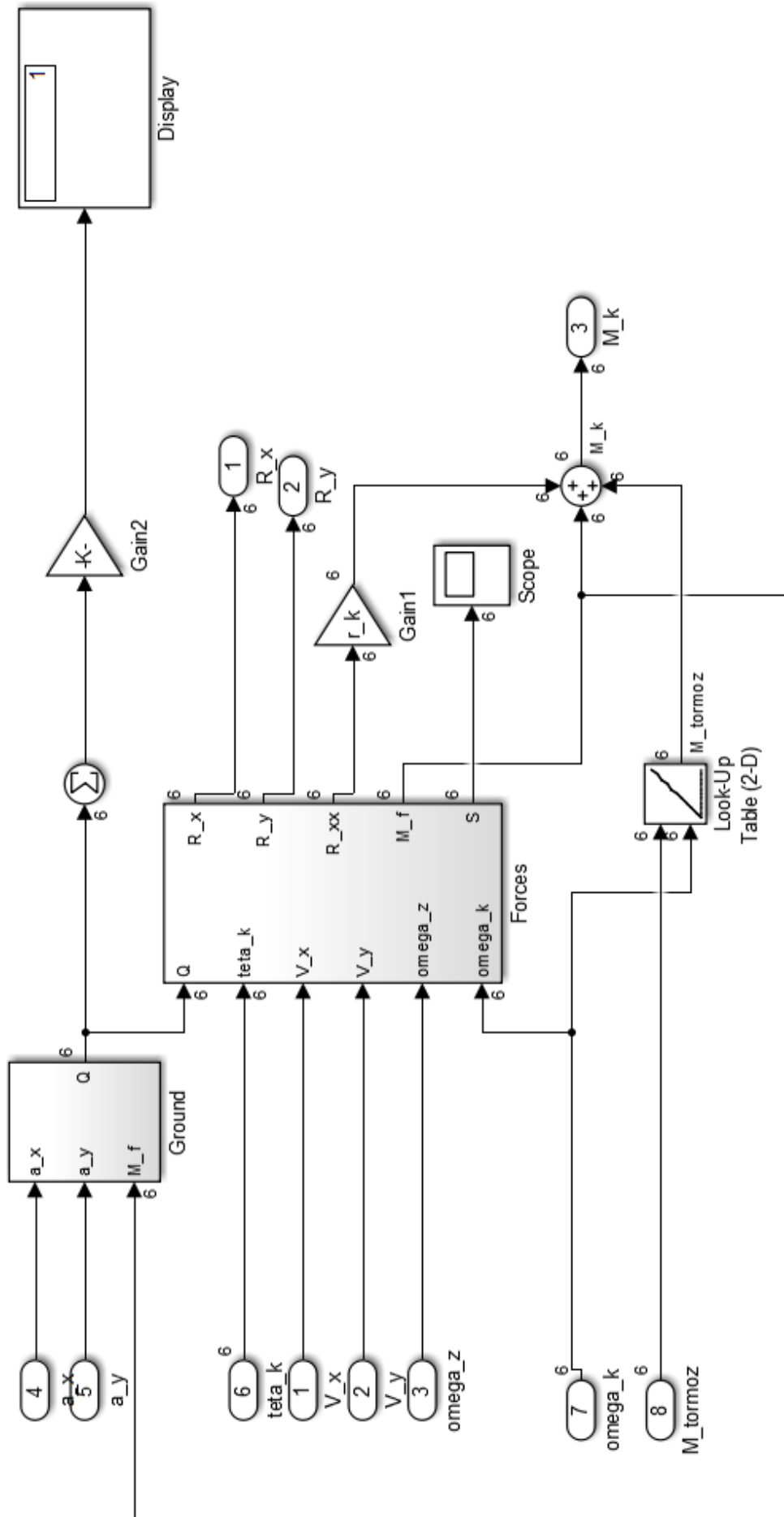


Рисунок А.6 – Блок описания взаимодействия колеса с опорной поверхностью

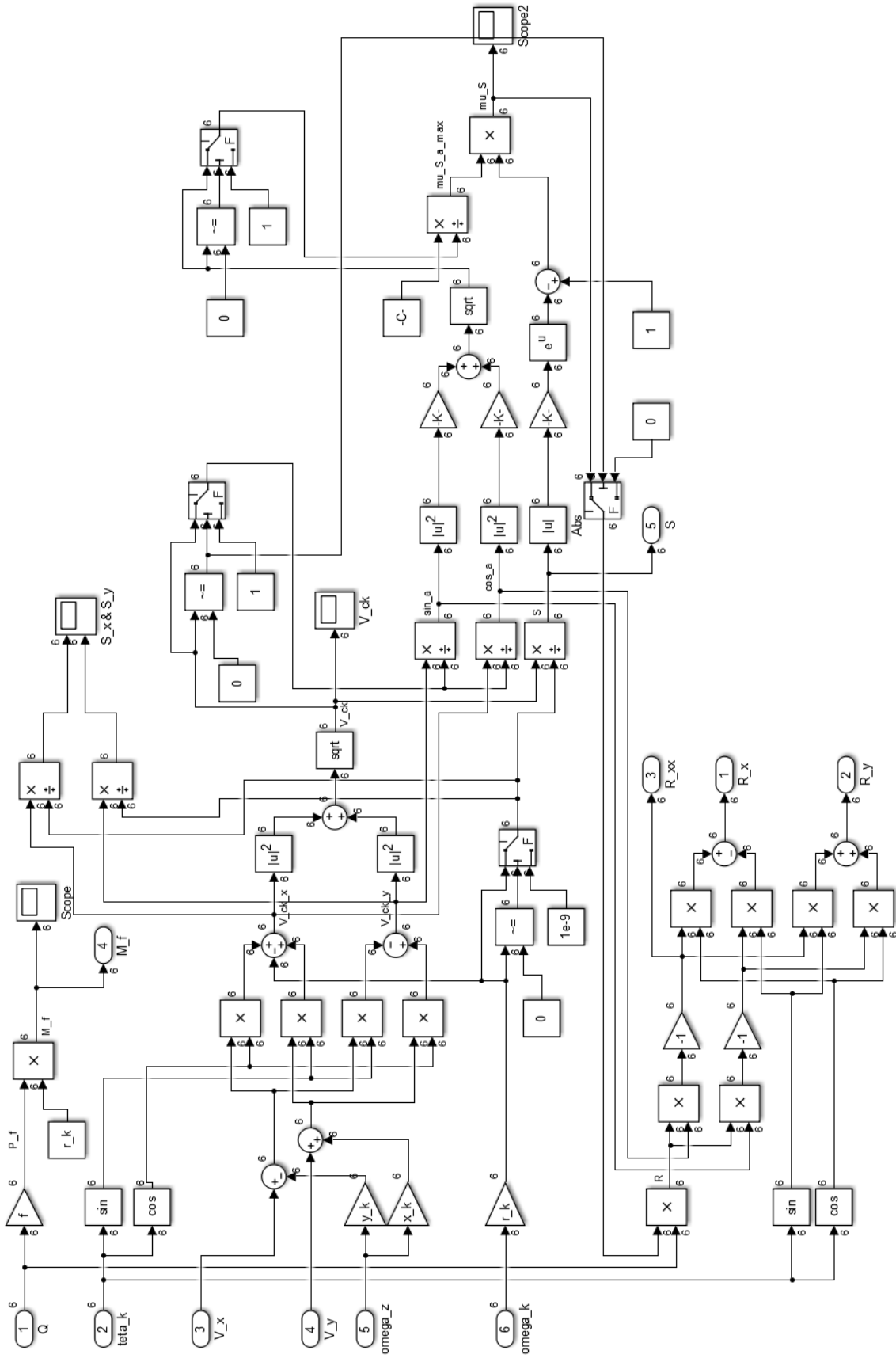


Рисунок А.7 – Блок описания расчета опорных реакций

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 126992

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ШИНАХ

Патентообладатель(ли): *Усиков Виталий Юрьевич (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012139408

Приоритет полезной модели **13 сентября 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **20 апреля 2013 г.**

Срок действия патента истекает **13 сентября 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B.P. Simonov', is written over a white background.

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **126 992**⁽¹³⁾ **U1**(51) МПК
B60C 23/00 (2006.01)**(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2012139408/11, 13.09.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
13.09.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 13.09.2012

(45) Опубликовано: 20.04.2013 Бюл. № 11

Адрес для переписки:

644098, г.Омск-98, 14 Военный городок, 144,
кв.22, В.Ю. Усикову

(72) Автор(ы):

Усиков Виталий Юрьевич (RU),
Келлер Андрей Владимирович (RU),
Ушнурцев Станислав Владимирович (RU),
Дегтярь Владимир Владимирович (RU),
Алтухов Яков Вячеславович (RU),
Хламцов Федор Николаевич (RU),
Петунин Павел Владимирович (RU),
Бахшиев Анар Акиф-Оглы (RU),
Рослов Сергей Валерьевич (RU),
Рукавишников Андрей Владимирович (RU),
Держач Дмитрий Александрович (RU),
Заварзин Владимир Алексеевич (RU),
Банин Артем Андреевич (RU),
Клементьев Роман Павлович (RU),
Рекус Вадим Сергеевич (RU),
Селиванов Сергей Станиславович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Усиков Виталий Юрьевич (RU)

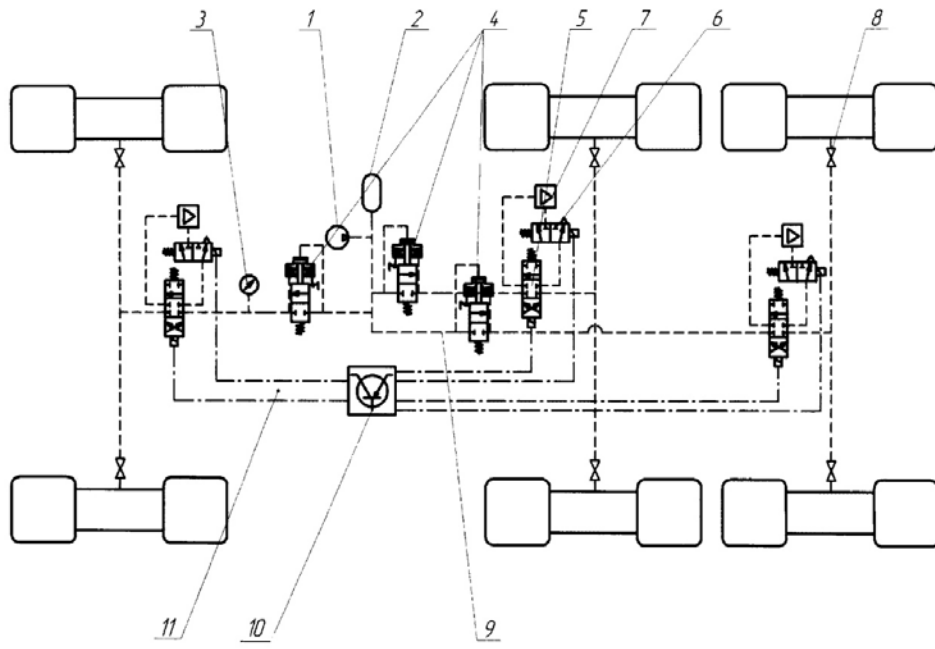
(54) СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ШИНАХ

(57) Формула полезной модели

Система регулирования давления воздуха в шинах, содержащая компрессор, пневматический баллон, датчик давления воздуха, электромагнитные клапаны управления давлением и эжекторы по числу осей, колесные клапаны по числу колес, связанные посредством трубопроводов и шлангов, электрический блок управления, связанный посредством электрических цепей с блоком управления давлением воздуха и электромагнитными клапанами управления давлением, отличающаяся тем, что она дополнительно оснащена регуляторами давления по числу осей, механически соединенными с подвеской транспортного средства.

RU 1 2 6 9 9 2 U 1

RU 1 2 6 9 9 2 U 1



RU 1 2 6 9 9 2 U 1

RU 1 2 6 9 9 2 U 1

УТВЕРЖДАЮ
Начальник Омского
автобронетанкового инженерного института
генерал-майор

А. Фёдоров

«14» сентября 2015 г.

АКТ
использования результатов диссертационной работы
«Повышение проходимости автомобилей многоцелевого назначения
путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах»

Комиссия в составе: заместителя начальника института по учебной и научной работе, кандидата технических наук, доцента – полковника Коровина С.Д., начальника учебно-методического отдела, кандидата педагогических наук, доцента – полковника Белоусова А.Г., заместителя начальника учебно-методического отдела – подполковника Сизова А.Е. свидетельствует о том, что материалы диссертационной работы преподавателя 6 кафедры (эксплуатации бронетанковой и автомобильной техники) майора Усикова В.Ю. «Повышение проходимости автомобилей многоцелевого назначения путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах» использованы в учебном процессе Омского автобронетанкового инженерного института:

- на 6 кафедре (эксплуатации бронетанковой и автомобильной техники);
- на 3 кафедре (боевых гусеничных, колесных машин и военных автомобилей);
- на 10 кафедре (вождения).

Материал работы внедрен в учебную программу изучения дисциплин: «Эксплуатация военных гусеничных и колесных машин», «Организация и безопасность движения», «Теория, конструкция и проектирование военных колесных машин».

Председатель комиссии: полковник С. Коровин
Члены комиссии: полковник А. Белоусов
подполковник А. Сизов

АКТ

об использовании научных и практических результатов диссертационной работы, соискателя ученой степени кандидата технических наук, по специальности 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины», при кафедре «Колесные, гусеничные машины и автомобили» Автотракторного факультета Южно-Уральского государственного университета (Национальный исследовательский институт), преподавателя кафедры Омского автобронетанкового инженерного института (филиала) Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации майора **УСИКОВА Виталия Юрьевича**

Диссертационная работа Усикова В.Ю. на тему **«Повышение проходимости автомобилей многоцелевого назначения путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах»** посвящена решению актуальной проблемы, связанной с обеспечением эффективности использования автомобилей многоцелевого назначения, а именно повышением уровня опорной проходимости при движении в сложных дорожных условиях и по пересеченной местности.

В работе автором получены следующие результаты:

- изложено новое научно обоснованное техническое решение повышения опорной проходимости автомобилей многоцелевого назначения за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах;
- обоснованы рациональные значения давления воздуха в шинах образцов автомобильной техники при его регулировании децентрализованным способом;
- разработана система регулирования давления воздуха в шинах колес автомобилей многоцелевого назначения, позволяющая устанавливать давление воздуха в шинах колес каждой оси в зависимости от приходящейся на них нагрузки.

Теоретическая часть работы использована НИИЦ БТ 3 ЦНИИ Минобороны России в сравнительной оценке систем регулирования давления воздуха в шинах колес многоосных бронированных колесных машин отечественного и зарубежного производства при проведении испытаний образцов по оценке требований к боестойким колесам. Практические результаты работы учитываются при разработке разделов инструкций для механиков-водителей колесных бронетранспортёров по способам преодоления труднопроходимых участков местности, а также в предложениях для промышленности по совершенствованию конструкции составных частей, влияющих на проходимость бронетранспортёров.

Начальник НИИЦ БТ
3 ЦНИИ Минобороны России



А. Пантелеев

« 18 » 02 2015 г.



УТВЕРЖДАЮ

Командир войсковой части 72154
 полковник *[Signature]* О. Бузаев
 « 10 » 03 2015 года

АКТ

**использования результатов диссертационной работы
 «Повышение проходимости автомобилей многоцелевого назначения
 путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах»**

Комиссия в составе:

председателя комиссии: командира воинской части
 полковника Бузаева О. В.;

членов комиссии: заместителя командира воинской части по
 вооружению подполковника Мансурова С.Р.;
 начальника автомобильной службы
 ст. лейтенанта Пимкина И. В.,

подтверждает использование результатов диссертационной работы
 Усикова Виталия Юрьевича «Повышение проходимости автомобилей
 многоцелевого назначения путем децентрализации регулирования давления
 воздуха в шинах».

Рекомендации по децентрализации регулирования давления воздуха в
 шинах учтены и применены в ходе ежедневной эксплуатации автомобильной
 техники транспортной группы эксплуатации, при проведении занятий по
 боевой подготовке, при выполнении мероприятий повседневной
 деятельности (совершение маршей в составе автомобильных колонн,
 перевозка личного состава и материальных ценностей). Обоснованные
 рациональные значения давления воздуха в шинах рекомендованы и
 применяются водителями автомобильной техники при движении в условиях
 бездорожья, по пересеченной местности и в ухудшенных дорожных
 условиях.

По результатам комплекса мероприятий по эксплуатации военной
 автомобильной техники с использованием результатов диссертационного
 исследования, проведенного майором Усиковым Виталием Юрьевичем, в
 период с апреля по октябрь 2014 года зафиксировано повышение тяговых
 возможностей автомобилей и снижение расхода топлива в среднем на 7 %.

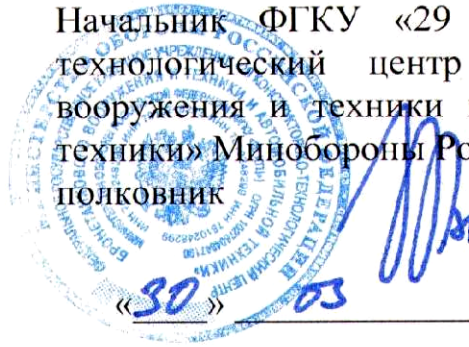
Заместитель командира части по вооружению подполковник *[Signature]* С. Мансуров

Начальник штаба майор *[Signature]* А. Халупо

Начальник автомобильной службы ст. лейтенант *[Signature]* И. Пимкин

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ФГКУ «29 Конструкторско-технологический центр бронетанкового вооружения и техники и автомобильной техники» Минобороны России
полковник



А.В. Агриков

2015 года

АКТ

реализации научных результатов диссертационной работы
выполненной Усиковым Виталием Юрьевичем на тему:
«Повышение проходимости автомобилей многоцелевого назначения
путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах»
по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины»

Комиссия в составе: председателя – главного конструктора Василюка А.П. и членов комиссии: заместителя начальника центра – главного инженера, подполковника Бушева М.В., начальника конструкторского отдела Вяткина К.Е. составила настоящий акт и подтверждает, что основные положения диссертационной работы, и полученные результаты решают проблему связанную с обеспечением эффективности использования автомобилей многоцелевого назначения, а именно повышением уровня опорной проходимости при движении в сложных дорожных условиях и по пересеченной местности.

По результатам работы автором:

- изложено новое научно обоснованное техническое решение повышения опорной проходимости автомобилей многоцелевого назначения за счет децентрализации регулирования давления воздуха в шинах;
- обоснованы рациональные значения давления воздуха в шинах образцов автомобильной техники при его регулировании децентрализованным способом;
- разработана система регулирования давления воздуха в шинах колес автомобилей многоцелевого назначения, позволяющая устанавливать давление воздуха в шинах колес каждой оси в зависимости от приходящейся на них нагрузки.

Полученные результаты проведенного диссертационного исследования имеют научную и практическую ценность, имеют существенное значение в улучшении эксплуатационных свойств полноприводных автомобилей и обеспечении эффективности их использования, и реализованы ФГКУ «29 Конструкторско-технологический центр бронетанкового вооружения и техники и автомобильной техники» Минобороны России при выполнении

научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также при подготовке тактико-технических заданий на опытно-конструкторские работы по разработке новых семейств унифицированных автомобильных шасси и автомобильных платформ нового поколения.

Председатель комиссии:

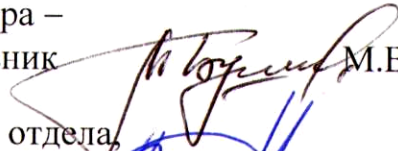
главный конструктор



А.П. Василюк

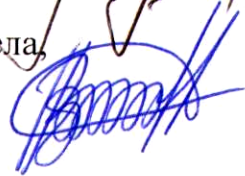
Члены комиссии:

заместитель начальника центра –
главный инженер, подполковник



М.В. Бушев

начальник конструкторского отдела,
капитан



К.Е. Вяткин