

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск 2015

Работа выполнена на кафедре «Колесные, гусеничные машины и автомобили» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет).

**Научный руководитель:** Келлер Андрей Владимирович,  
доктор технических наук, профессор  
(ФГБОУ ВПО ЮУрГУ(НИУ), профессор кафедры)

**Официальные оппоненты:** Богданов Андрей Владимирович,  
доктор технических наук, доцент,  
(ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ,  
заведующий кафедрой),  
Челябинская область, г. Троицк;  
Горелов Василий Александрович,  
доктор технических наук, профессор,  
(ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
профессор кафедры), г. Москва.

**Ведущая организация –** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Защита состоится 09.12.2015 года в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

Тел/факс (351) 267 91 23

E-mail: D 212.298.09@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) и на сайте <http://susu.ac.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

 Лазарев Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Значительную часть парка автомобильной техники, широко используемую в различных сферах деятельности человека, составляют полноприводные автомобили различных модификаций – автомобили многоцелевого назначения (АМН). Условия эксплуатации АМН предусматривают движение в различных дорожных условиях, при этом значительную часть всего пути автомобили движутся в условиях бездорожья. В связи с чем, актуальным остается вопрос повышения проходимости. Одним из эффективных способов повышения опорной проходимости при движении АМН по деформируемой опорной поверхности (ДОП) является использование централизованной системы регулирования давления воздуха в шинах (СРДВШ), которая позволяет устанавливать и поддерживать одинаковое давление воздуха в шинах всех колес. На АМН применяются одинарные колеса, следствием чего является одинаковая ширина колеи всех осей, и при совершении прямолинейного движения каждое следующее колесо движется вслед предыдущему. Следствием движения каждого предыдущего колеса является изменение физико-механических свойств грунта опорной поверхности (образование колеи) и изменение всех показателей взаимодействия колесного движителя (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.

**Степень разработанности темы исследования.** 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.

В настоящее время разработан ряд математических моделей движения АМН по ДОП. Учеными и инженерами научных школ МГТУ имени Н.Э. Баумана, МГТУ «МАМИ», ЮУрГУ (НИУ), НАТИ, НАМИ, НИИЦ АТ 3 ЦНИИ МО РФ, Рязанского военного автомобильного института, ОАО «КАМАЗ», ОАО «АЗ УРАЛ» и др. создана богатая теоретическая и экспериментальная научная база, но в то же время исследованию процесса качения по ДОП одиночного эластичного колеса и КД в целом в зависимости от нагрузки, приходящейся на колеса, последовательности качения колес в образуемой ими колее и установленного внутреннего давления воздуха в шинах, а также с варьированием этих параметров, уделялось недостаточно внимания.

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

**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.

**Объект исследования.** Система «АМН – внешняя среда».

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

**Научная новизна состоит:**

- в разработке математической модели движения многоосных автомобилей по ДОП на базе моделей, разработанных учеными 21 НИИИ 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;
- в получении функциональной зависимости 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;
- в обосновании способа 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 полученных результатов:**

- разработанная математическая модель позволяет расчетным путем определить показатели характеристик прямолинейного движения многоосного автомобиля по ДОП 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;

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

**Методология и методы исследования** включают в себя: математическое моделирование движения одиночного эластичного колеса по деформируемой опорной поверхности; теоретический анализ факторов, влияющих на проходимость автомобиля и эффективность его движения; экспериментальные исследования качения одиночного эластичного колеса и движения АМН по деформируемому грунту. Выполнение исследования базировалось на основных положениях прикладной теории движения автомобиля; теоретической механики; теории автоматического управления; теории решения изобретательских задач; методах инженерного эксперимента; теории вероятности; математического анализа и планирования эксперимента.

**Положения, выносимые на защиту:**

– разработанная математическая модель движения АМН по ДОП с учетом функциональной зависимости коэффициента сопротивления движению от номера прохода колес по колею, 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.

**Достоверность результатов работы** определяется результатами проведенных лабораторных экспериментальных исследований качения одиночного эластичного колеса по деформируемому грунтовому основанию и натурального экспериментального исследования движения АМН по деформируемым грунтам.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации и результаты исследований были 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» («СибАДИ»), г. Омск, 2011 г.; VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования» («СибАДИ»), г. Омск, 2012 г.; 67-й научно-практической конференции с международным участием «Теория, методы проектирования машин и процессов в строительстве» («СибАДИ»), г. Омск, 2013 г.;

– VIII Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» («ОмГТУ»), г. Омск, 2012 г.; IX Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» («ОмГТУ»), г. Омск, 2014 г.;

– межрегиональной научно-практической конференции «Инновационные технологии, системы вооружения и военной техники, наука и образование» «Броня-2012», г. Омск, 2012 г.; на межрегиональной научно-практической конференции «Оборонно-промышленный комплекс: проблемы и перспективы развития» «ВТТВ-2013», г. Омск, 2013 г.; на VII межрегиональной научно-

практической конференции «Инновационные технологии, системы вооружения и военной техники, наука и образование» «Броня-Омск-2014», г. Омск, 2014 г.;

– на IV Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса» («КузГТУ»), г. Новокузнецк, 2014 г.

**Реализация результатов работы.** Основные результаты работы реализованы: ОАО «КАМАЗ» и ОАО «Автомобильный завод «Урал»» при проектировании перспективного семейства полноприводных автомобилей; НИИЦ АТ и БТ 3 ЦНИИ МО РФ при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; ГАБТУ МО РФ при разработке общих тактико-технических требований к образцам автомобильной техники и технических заданий на их разработку, а также оценке технического уровня разработанных образцов АМН; в воинских частях МО РФ при эксплуатации АМН с учетом практических рекомендаций по децентрализации регулирования давления воздуха в шинах при движении по ДОП; в учебном процессе ФГБОУ «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск и ФГКВОУ «Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала-армии А.В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации.

**Публикации.** Основные положения работы опубликованы в 27 научных статьях (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.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (180 наименований), приложения, содержит 159 страниц, 47 рисунков, 16 таблиц.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность, научная новизна и цель работы.

**В первой главе** проведен анализ научных работ по вопросам повышения проходимости АМН, климатических и дорожных условий эксплуатации АМН, влияния на проходимость конструктивных факторов.

Проведенный анализ климатических и дорожных условий эксплуатации АМН показал, что типичным является движение АМН по покрытиям с различной степенью неравномерного распределения коэффициентов сопротивления качению и сцепления, что обуславливает потребность в применении мер, необходимых для обеспечения требуемой эффективности АМН за счет снижения затрат энергии на движение и повышения тяговых возможностей.

Проведенный анализ влияния на проходимость конструктивных факторов показал, что значительное влияние на проходимость АМН оказывают количество и расположение по базе колес, возможность изменения нормальных нагрузок и кру-

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

Изучению аспектов опорной проходимости колесных транспортных средств, а также связанных с ними вопросов теории качения одиночного КД по ДОП 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, А.В. Келлера, Н.Ф. Кошарного, В.В. Ларина, М.Н. Летошнева, В.Н. Наумова, В.А. Петрушова, Ю.В. Пирковского, В.Ф. Платонова, М.П. Чистова, И.В. Чичекина, Е.А. Чудакова, С.Б. Шухмана, М.Г. Bekker, Z. Janosi, A.R. Reese, J.Y. Wong и многих других, при этом многими авторами признается особая важность процесса регулирования давления воздуха в шинах АМН и его влияние на опорную проходимость. Учеными 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, но несмотря на это, мало внимания уделяется необходимости установления рационального значения давления воздуха в каждом колесе в зависимости от типа ДОП, нагрузки, приходящейся на колеса и условий их взаимодействия с деформируемым грунтом.

**Вторая глава** посвящена: разработке математической модели движения АМН по ДОП с учетом функциональной зависимости коэффициента сопротивления качению колес от установленного давления воздуха в шинах, нагрузки, приходящейся на них и их расположения по базе автомобиля, базирующейся на положениях моделирования движения автомобиля, разработанных в 21 НИИИ МО РФ и МГТУ имени Н.Э. Баумана; проведению экспериментального исследования процесса исследования качения колеса по грунтовой поверхности в лабораторных условиях на стенде «грунтовой канал». Принятая за основу математическая модель учитывает деформацию грунта при движении автомобиля, возникновение бульдозерного сопротивления элементов конструкции, буксование колесного движителя по опорной поверхности, вертикальную нагрузку на колеса, расположение колес в колесной формуле, давление воздуха в шинах. При этом была использована плоская расчетная схема (рисунок 1).

Уравнение прямолинейного движения автомобиля имеет вид:

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

Динамика движения колес описывается уравнениями:

$$J_{k_i} \dot{\omega}_{k_i} = M_{k_i} - (1 - S_{\sigma_i}) (f_{w_i} + \varphi_i) R_{z_i} r_{k_0}, \quad (2)$$

$$m_{k_i} \dot{V}_{x_{k_i}} = \varphi_i R_{z_i} - P_{x_i} - m_{k_i} g \sin(a + \beta), \quad (3)$$

Сила, действующая со стороны колеса по оси X:

$$P_{x_i} = (X_{K_i} - Q_{K_i}) C_{подв} + (V_{x_{K_i}} - V_{xc}) B_{подв}, \quad (4)$$





$$R_{z1} + R_{z2} - \frac{G_a \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0, \quad (9)$$

$$G_a \cos(\alpha + \beta)X_{ki} - 2(M_{k1} + M_{k2}) + P_{KP}z_{TCY} - 2R_{z2}L = 0. \quad (10)$$

– для трехосного АМН с задней балансирующей тележкой:

$$R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} - \frac{G_a \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0, \quad (11)$$

$$R_{z2} - R_{z3} = 0, \quad (12)$$

$$G_a \cos(\alpha + \beta)X_{ki} - 2(M_{k1} + M_{k2} + M_{k3}) + P_{KP}z_{TCY} - 4R_{z2}\left(L - \frac{L_{3-4}}{2}\right) = 0. \quad (13)$$

– для четырехосного АМН с передней и задней балансирующими тележками:

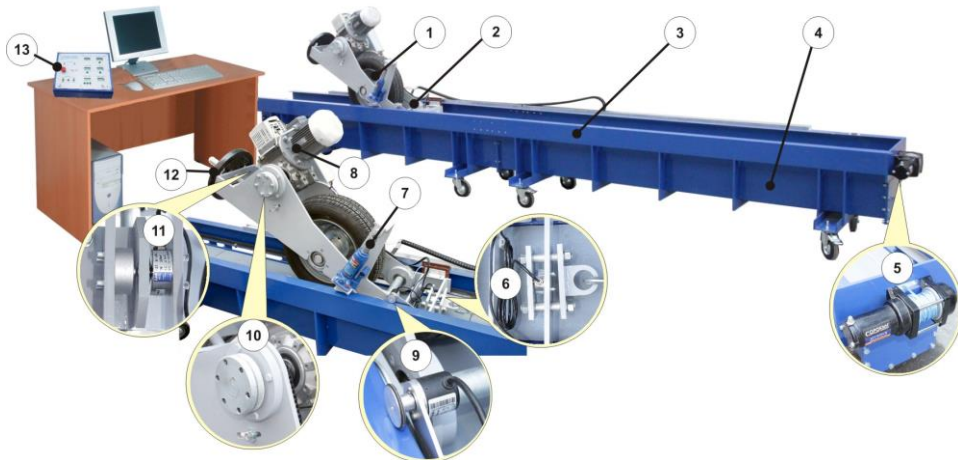
$$R_{z1} - R_{z2} = 0, \quad (14)$$

$$R_{z3} - R_{z4} = 0, \quad (15)$$

$$2R_{z1} + 2R_{z2} - \frac{G_a \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0, \quad (16)$$

$$G_a \cos(\alpha + \beta)X_{ki} - 2(M_{k1} + M_{k2} + M_{k3} + M_{k4}) + P_{KP}z_{TCY} - 2(R_{z2}L_{1-2} + R_{z3}L_{1-3} + R_{z4}L) = 0. \quad (17)$$

Разработанный стенд типа «грунтовый канал» (рисунок 2) позволил провести лабораторные исследования качения колеса по ДОП и определить функциональные зависимости коэффициента сопротивления качению от варьируемых факторов для выбранных грунтов (суглинков различной влажности, мокрый речной песок).



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 – Лабораторный стенд «Грунтовый канал».

Был спланирован и проведен полный факторный эксперимент, в котором выполнялись серии прокатов колеса по подготовленному грунтовому основанию с варьированием факторов (нагрузки на колесо, давления воздуха в шине, номера прохода колеса), в ходе которых регистрировались параметры: частота вращения колеса; линейная скорость движения колеса; крутящий момент, подводимый к колесу. В каждой серии опытов проводились три проката колеса по грунтовому каналу. Очередной прокат колеса осуществлялся по колее в грунтовом основании, проложенной при предыдущем проходе. Обработка результатов проведенного лабораторного экспериментального исследования позволила выявить характер влияния на коэффициент сопротивления качению нормальной

нагрузки, давления воздуха, номера прохода колеса по грунтовому основанию, установить функциональную зависимость от этих параметров и определить значения соответствующих коэффициентов коррекции коэффициента сопротивления качению для каждого типа грунта, по которому осуществлялось исследование качения колеса. Коэффициенты коррекции коэффициента сопротивления качению имеют значение:

Для грунтового основания «пашня»:  $k_0 = -0,0008381$ ;  $k_1 = -0,0650083(1/\text{МПа})$ ;  $k_2 = 0,0000031(1/\text{Н})$ ;  $k_3 = 0,0002618$ ;  $k_4 = 0,0002446(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$ ;  $k_5 = 0,0203731(1/\text{МПа})$ ;  $k_6 = -0,000001(1/\text{Н})$ ;  $k_7 = -0,0000766(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$ . Для грунтового основания «мокрый песок»:  $k_0 = -0,019127$ ;  $k_1 = -0,0895536(1/\text{МПа})$ ;  $k_2 = 0,0000457(1/\text{Н})$ ;  $k_3 = 0,005996$ ;  $k_4 = 0,0002141(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$ ;  $k_5 = 0,0284891(1/\text{МПа})$ ;  $k_6 = -0,0000143(1/\text{Н})$ ;  $k_7 = 0,0000671(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$ . Для грунтового основания «суглинок-20»:  $k_0 = 0,019103$ ;  $k_1 = 0,0217368(1/\text{МПа})$ ;  $k_2 = 0,0000032(1/\text{Н})$ ;  $k_3 = -0,005361$ ;  $k_4 = 0,0000364(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$ ;  $k_5 = -0,0060687(1/\text{МПа})$ ;  $k_6 = -0,0000009(1/\text{Н})$ ;  $k_7 = -0,0000102(1/\text{МПа}\cdot\text{Н})$ . Для грунтового основания «суглинок-35»:  $k_0 = 0,0090937$ ;  $k_1 = 0,0012769(1/\text{МПа})$ ;  $k_2 = 0,0000152(1/\text{Н})$ ;  $k_3 = -0,0021303$ ;  $k_6 = -0,0000036(1/\text{Н})$ .

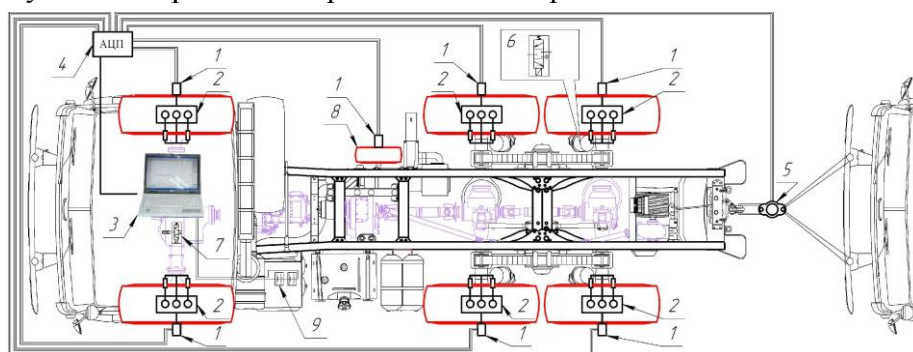
Анализ проведенного лабораторного исследования качения колеса по грунтовому основанию позволяет сделать вывод, что  $P_w$  и  $R_z$  оказывают приблизительно одинаковое воздействие на изменение  $f_{w0}$ , но при этом  $n$  оказывает большее воздействие, чем  $P_w$  и  $R_z$  отдельно. С увеличением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

**В третьей главе**, с целью оценки адекватности разработанной математической модели и эффективности предлагаемого способа повышения проходимости АМН выполнены экспериментальные исследования по методике, основанной 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» и методиках оценки подвижности АМН в полевых условиях, предложенных Я.С. Агейкиным. Испытаниям подвергался образец АМН КАМАЗ-5350 (рисунок 3). Испытания проводились в три этапа: 1-й – определение кинематических и силовых характеристик колес, параметров взаимодействия с опорной поверхностью; 2-й – определение расхода топлива по соответствующему типу ДОП; 3-й – определение максимальной силы тяги на крюке АМН. Для осуществления непрерывного измерения и регистрации вышеуказанных величин использовался комплект измерительно-регистрирующей аппаратуры (рисунок 4). Экспериментальные исследования проводились по различным типам грунта с максимально однородными характеристиками в районе пос. Черемушки Омской области и в пойме реки Иртыш на участках: суглинистого грунта с влажностью около 20 % и около 35 %; влажного речного песка влажностью около 30 %; свежевспаханного суглинка с влажностью около 35 %. При этом производилось определение показателей взаимодействия колес испытуемого образца АМН с грунтовым основанием опорной поверхности – коэффициента сопротивления качению и коэффициента сцепления. 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, раз-

личной загруженностью АМН, с варьированием давления воздуха в шинах от минимального до номинального с использованием штатной СРДВШ.



Рисунок 3 – Фрагменты проведения экспериментальных исследований.



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 («пятое») колесо; 9 – две аккумуляторные батареи 6 СТ-190 ТРМ

Рисунок 4 – Схема измерительно-регистрающего комплекса.

Оценка адекватности математической модели производилась при осуществлении движения испытуемого образца АМН на скоростях до 25 км/ч на пониженной передаче с различной нагрузкой на крюке АМН, различной загруженностью АМН, с варьированием давления воздуха в шинах от минимального до номинального с использованием штатной СРДВШ. Для оценки адекватности 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 (рисунок 5). Анализ полученных результатов, позволил сделать вывод, что зависимости, полученные по результатам моделирования движения испытанного образца АМН, соответствуют характеру изменения кривых коэффициента сопротивления качению колеса в функции от нагрузки и давления воздуха в шине, полученных по результатам экспериментальных исследований. При этом погрешность не превышает 8,5 %, а в целом по совокупности параметров находится в пределах от 7,3 % до 11,2%.

**В четвертой главе** проведено обоснование способа повышения проходимости путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах, установлены рациональные значения давления воздуха для АМН при движении по ДОП, проведена оценка эффективности и технико-экономическое обоснование предлагаемого решения, разработана СРДВШ.

На основе разработанной математической модели с использованием программного продукта Matlab в пакете Simulink проведен расчет влияния давления воздуха в шинах на сопротивление качению колеса при последовательных

проходах и различных вертикальных нагрузках. Анализ результатов (рисунок б) математического моделирования позволил определить интервалы рациональных значений давления воздуха в шине колеса, соответствующие наименьшим значениям коэффициента сопротивления качению при движении по грунтовому основанию с варьированием нагрузки, приходящейся на колесо, и в зависимости от номера прохода (таблица 1).

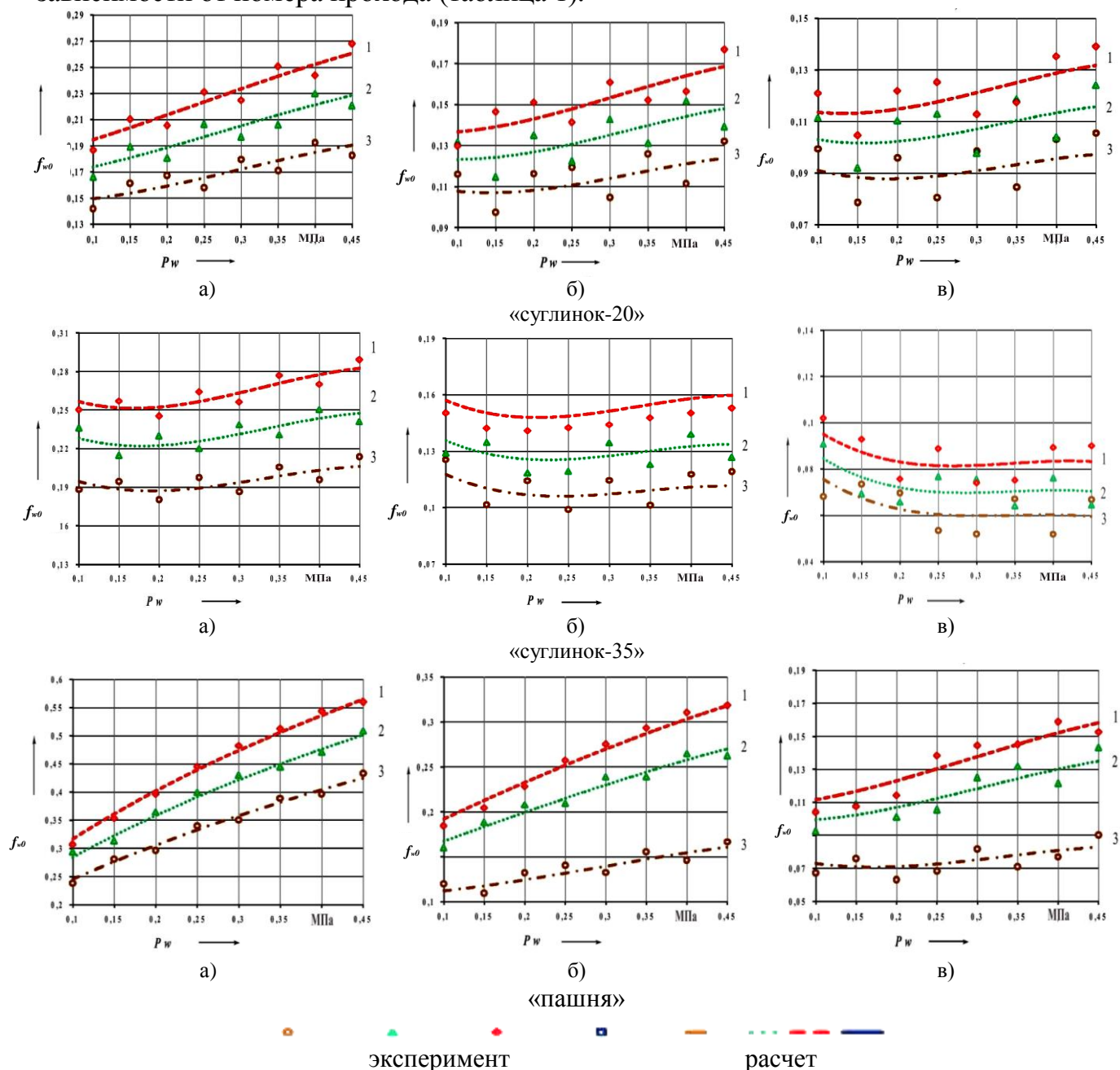


Рисунок 5 – Результаты расчетных данных и экспериментального исследования зависимости  $f_w$  от  $P_w$  при движении АМН по грунтовым основаниям: а – колеса первой оси (нагрузка на колесо: 1 – 26000 Н; 2 – 24500 Н; 3- 23000 Н); б – первые колеса задней тележки, в – вторые колеса задней тележки (нагрузка на колесо 1 – 26000 Н, 2 – 19000 Н, 3- 12500 Н).

Анализ результатов проведенных испытаний по определению максимальной силы тяги на крюке позволил сделать вывод, что использование предлагаемого способа повышения проходимости АМН дает увеличение силы тяги на крюке автомобиля в среднем на 5,7 % и снижение расхода топлива в среднем на 5,4 % (рисунок 7), обеспечивает в 1,05–1,07 раза большие значения реализуемой силы тяги на крюке и в 1,04–1,07 раза снижение расхода топлива. Для повышения эффективности штатной СРДВШ путем регулирования давления воздуха в шинах в зависимости от нагрузки, приходящейся

на колеса каждой оси автомобиля, предлагается техническое решение, представленное на рисунке 8. Применение автоматизированной СРДВШ указанной конструкции позволяет оперативно адаптировать колесный движитель АМН к дорожным условиям, устанавливая рациональное давление воздуха в шинах, в зависимости от нагрузки, приходящейся на колеса. Проведенное технико-экономическое обоснование показывает, что использование предложенных рациональных значений давления воздуха с применением разработанной конструкции СРДВШ дает годовой экономический эффект на один автомобиль около 20000 рублей.

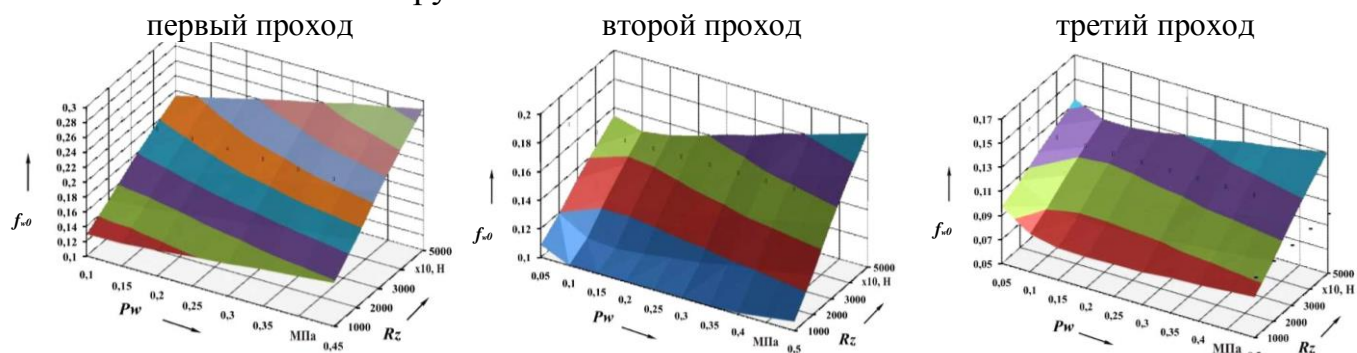
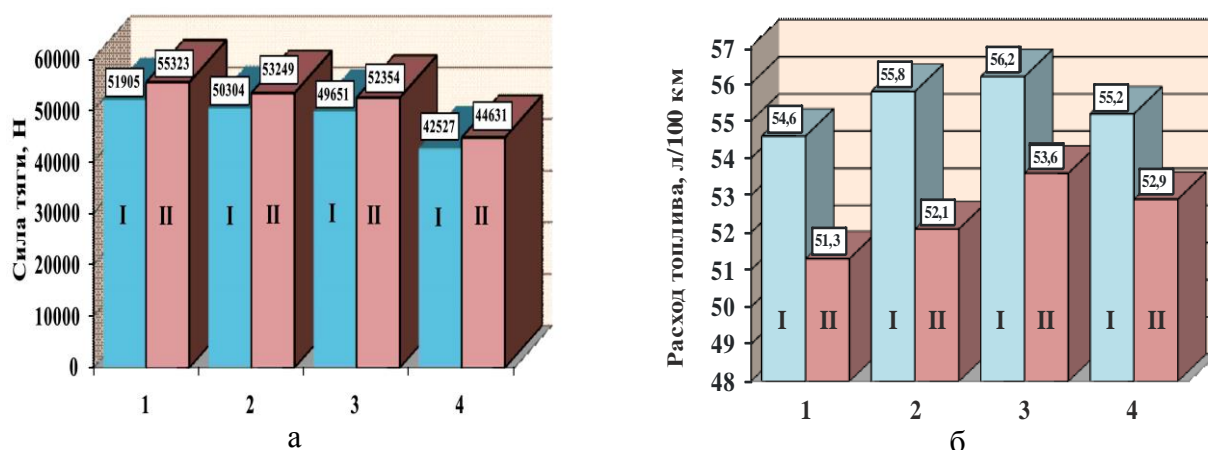


Рисунок 6 – Зависимости  $f$  в функции от  $R_z$ ,  $P_w$  и номера прохода колеса при движении по «суглинку-20».

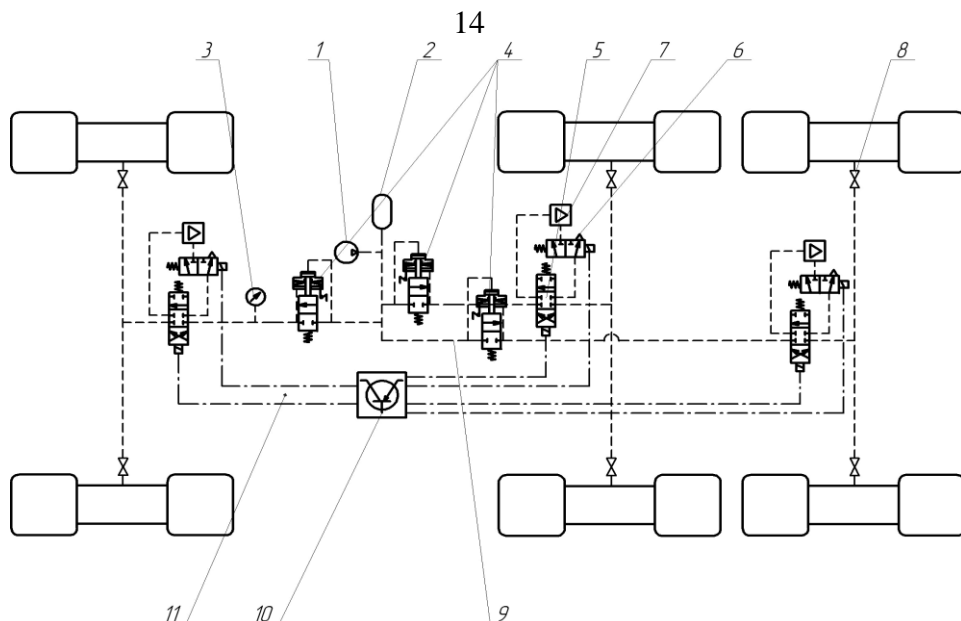
Таблица 1 – Рекомендованные значения давления воздуха в шинах для ДОП.

$R_z$ , 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



а – определение максимальной силы тяги на крюке; б – определение расхода топлива; 1 – движение по «суглинку-20»; 2 – движение по «суглинку-35»; 3 – движение по «пашне»; 3 – движение по «мокрому песку». I – давление воздуха в шинах в соответствии с руководством по эксплуатации; II – движение АМН с рекомендованным давлением воздуха в шинах

Рисунок 7 – Результаты проведенных испытаний АМН КАМАЗ-5350.



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 8 – Схема предлагаемой конструкции СРДВШ (Патент РФ № 126992).

## 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 коллективом ученых 21 НИИИ 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 сопротивле-

ния 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 вертикальной 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 натурных 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. Относительные (по отношению к первой оси) рациональные значения давления воздуха в шинах 1–2–3–4 осей при движении по типичным ДОП следующее:

– для снаряженного автомобиля: по «суглинка-20» – 1,0; 1,4; 1,4; 2,2; по «суглинка-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 «суглинка-20» – 1,0; 1,7; 1,7; 2,3; по «суглинка-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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. 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.
2. 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.

3. 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.
4. 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.
5. Усиков, В.Ю. Уточнение математической модели прямолинейного качения одиночного эластичного колеса по деформируемому грунту / А.В. Келлер, В.Ю. Усиков, С.В. Ушнурцев // Вестник Академии военных наук. – 2013. – №4 (45). – С. 169–173.
6. Усиков, В.Ю. Децентрализованное регулирование давления воздуха в шинах – способ повышения проходимости автомобилей многоцелевого назначения / В.Ю. Усиков, А.В. Келлер // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 12. – С. 14–19.
7. Усиков, В.Ю. Обоснование рациональных закономерностей децентрализованного регулирования давления воздуха в шинах / В.Ю. Усиков // Омский научный вестник. – 2015. – №1(137). – С. 92–96.

#### **Труды, опубликованные в других изданиях**

8. 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.
9. Усиков, В.Ю. Аспекты математического моделирования процесса регулирования давления воздуха в шинах // 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.
10. Усиков, В.Ю. Направление совершенствования конструкции системы регулирования давления воздуха в шинах для обеспечения проходимости образцов военной автомобильной техники / В.Ю. Усиков // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения (научно-аналитический журнал). – 2013. – Выпуск №2. – С. 18–23.
11. Усиков, В.Ю. Децентрализация регулирования давления воздуха в шинах как направление повышения проходимости автомобилей многоцелевого назначения / В.Ю. Усиков // Национальные приоритеты России. – 2014. – №2 (12). – С. 218–225.
12. Усиков, В.Ю. Научное обоснование способа повышения проходимости автомобилей многоцелевого назначения / В.Ю. Усиков // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. – 2014. – №24. – С. 111–114.
13. Усиков, В.Ю. Аспекты децентрализации регулирования давления воздуха в шинах / В.Ю. Усиков // Материалы IX Международной IEEE конференции «Динамика систем, механизмов и машин». Книга 2. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – С. 361–364.
14. Усиков, В.Ю. Рекомендации по децентрализации регулирования давления воздуха в шинах автомобилей многоцелевого назначения / В.Ю. Усиков // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса». – Новокузнецк: КузГТУ, 2014. – С. 37–41.

#### **Авторские свидетельства, патенты:**

15. Усиков, В.Ю. Система регулирования давления воздуха в шинах: пат. на пол. мод. 126992 Российская Федерация. №2012139408; заявл. 13.09.2012; опубл. 20.04.2013.