

На правах рукописи

Еремин Георгий Петрович

**МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ КОЛЁСНОЙ  
МАШИНЫ ПРИ ОТКАЗЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН  
ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОПОР ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИНАХ**

Специальность 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Смирнов Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э.Баумана

Официальные оппоненты: Котляренко Владимир Иванович  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Министерства транспорта Российской Федерации  
Чибисов Андрей Александрович  
кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО «Брянский автомобильный завод»

Ведущая организация:  
ОАО «ЦНИИСМ»  
(Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения)

Защита диссертации состоится "27" июня 2016 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан "\_\_\_" 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Сарач Е.Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одно из направлений решения задачи снижения уязвимости транспортного средства к повреждению колёсного движителя, в том числе, в результате попадания автомобиля под обстрел – это создание специальных конструкций колёс с применением упругодемптирующих элементов из композиционных материалов, монтируемых на ободе и применяемых с бескамерной шиной. Такие конструкции позволяют обеспечить достаточную подвижность транспортному средству после падения воздушного давления вшине до атмосферного или применяются без шины (Рис.1). Наиболее перспективными и распространёнными на сегодняшний день являются конструкции, эксплуатируемые совместно с пневматической шиной. Чаще всего они представляют собой пневматическую шину со смонтированной внутри на ободе колеса внутренней дополнительной опорой (ВДО) из полимерного композиционного материала (ПКМ).



Рис.1. Современные конструкции ВДО

Синтез подобного колёсного движителя и анализ на стадии проектирования характеристик конструкции с учетом особенностей композиционного материала, а также оптимизация размеров и формы, а также проведение поверочных расчётов с целью обеспечения заданной подвижности колёсной машины является актуальной задачей. В настоящее время эти задачи могут быть решены с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Данный метод позволяет с большой точностью решать задачи механики твердого тела, тепло- и массопереноса и другие нелинейные задачи для конструкций сложной геометрии. Кроме того, метод дает возможность интегрировать процесс расчета в процесс проектирования, в рамках которого

возможен выбор рационального конструктивного решения с приемлемыми временными затратами.

Следует отметить, что анализ эксплуатационных свойств колёсного движителя, оснащённого внутренней колёсной опорой, на стадии проектирования является достаточно сложной, существенно нелинейной задачей.

Цели и задачи. Целью работы является повышение подвижности колёсной машины путём применения колёсного движителя, оснащённого ВДО из ПКМ.

Для достижения цели в диссертации обоснованы и решены следующие задачи:

1) обоснованы требования к колёсному движителю, оборудованному ВДО, на основе анализа выполненных ранее работ, в том числе проведённого патентного поиска;

2) разработана математическая модель колёсного движителя, оснащённого ВДО из полимерных композиционных материалов;

3) разработан метод определения конструктивных параметров ВДО из эластомера для заданных условий эксплуатации колёсного движителя;

4) с использованием предлагаемого метода разработаны предложения по конструкции ВДО колеса для многоцелевого полноприводного автомобиля полной массой 4 тонны и экспериментально оценена работоспособность принятых решений.

Методы исследований. Исследования проводились аналитически и с помощью математического моделирования воздействия на ВДО нагрузок с использованием численного метода конечных элементов в пакете для инженерно-технических расчётов Ansys Student. Исследование свойств, связанных с работоспособностью полиуретана в заданном режиме работы, проводились расчётно-экспериментальным методом. Экспериментальные исследования основывались на испытании колёсного движителя, оснащённого ВДО, многоцелевого полноприводного автомобиля, разработанного на кафедре колёсных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана по заказу ФКУ НПО «СТИС» МВД России в рамках опытно-конструкторской работы шифр «Ансырь».

Научная новизна заключается:

- в математической модели колеса с ВДО из композиционного материала (полиуретанового эластомера), которая позволяет оценить характеристики ВДО. Точность математической модели колеса, оснащённого ВДО, подтверждена экспериментально. Особенностью математической модели является учёт гиперупругих свойств эластомера.

- в разработке метода создания безопасных колесных движителей из композиционных материалов (полиуретанового эластомера), отличающегося наличием цикла оптимизации основных конструктивных параметров,

направленной на минимизацию массы конструкции при заданном уровне допускаемых напряжений.

Практическая ценность работы. По результатам выполненных исследований предложен конструкционный облик внутренней дополнительной опоры для автомобиля многоцелевого назначения. Для практического использования разработан алгоритм создания безопасного колёсного движителя и определения оптимальных геометрических размеров конструкции ВДО для заданных условий эксплуатации.

Разработанный метод прогнозирования механического поведения и работоспособности ВДО из ПКМ под нагрузкой позволит сократить сроки проектирования и доводочных испытаний колёсного движителя. Научные положения диссертации, которые выносятся на защиту, обоснованы и подтверждены сопоставлением результатов расчётов с данными экспериментальных исследований.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются при выполнении соответствующих опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ в НИИ Специального Машиностроения, на кафедре колёсных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана, внедрены в Результаты работы внедрены в практику проектирования в ОАО «ЦНИИСМ» (Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения) и используется в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре колесных машин МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались

- 1) на научно-технических семинарах кафедры Колёсных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013...2016 гг. (г. Москва);
- 2) на научно-техническом семинаре в МАДИ в 2015г. (г. Москва);
- 3) на 26-ом симпозиуме "Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов" в 2015г. (Московская обл., пос. Поведники).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 3 – в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ общим объёмом 2,44 п.л., получен патент на полезную модель.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 135 листах машинописного текста, содержит 72 рисунка, 10 таблиц. Список литературы работы содержит 99 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования: разработка метода обеспечения подвижности автомобиля при отказе пневматических шин путём применения внутренних дополнительных опор из полимерных композиционных материалов, который позволит оценить энергетические и прочностные характеристики колёсного движителя, оснащённого ВДО, как в статических режимах, так и при движении; приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе диссертации анализируются общие проблемы и способы сохранения подвижности транспортного средства при повреждении шины, проводится анализ современных конструкций ВДО, патентный поиск. Особое внимание уделяется транспортным средствам специального назначения. Исследован опыт разработчиков по созданию колёсных движителей, оснащённых ВДО. Приводится описание типового конструктивного исполнения колёсного движителя с ВДО (Рис.2). Рассмотрены структурные особенности и механические свойства полиуретанов, влияющие на характеристики ВДО. Проанализированы известные подходы к описанию свойств гиперупругого материала и проведен краткий анализ работ, посвященных данной тематике, таких как работы А. Е. Белкина, И.З. Дашибаева, В.Л. Бидермана, Л. Трелоара. Проанализированы и изучены работы, посвящённые описанию математических моделей деформируемого колеса В.Л. Бидермана, А.Е. Белкина, Б.Л. Бухина, Е.А. Чудакова, Н.Е. Жуковского, М.В. Келдыша, Н.А. Фуфаева, В.С. Гоздека, С.Д. Попова, В.А. Петрушова, В.И. Кнороза, работы посвящённые созданию колёсных движителей из композиционных материалов А.Б. Карташова, А.А. Юсупова, а также работы, посвящённые созданию и анализу свойств колёсных движителей, оборудованных ВДО, В.М. Чудакова, В.Н. Абрамова, Т.А. Аипова, А.А. Чибисова. Проведен анализ численных методов моделирования одиночного колеса. Определены критерии работоспособности колёсного движителя, оборудованного ВДО при движении без избыточного воздушного давления в шине. Установлено, что наибольшие радиальные деформации ВДО, нагруженная вертикальной силой, испытывает при движении по твердой опорной поверхности. Напряженно-деформированное состояние ВДО в таких условиях характеризуется максимальными возможными при эксплуатации движителя эквивалентными напряжениями, в связи с чем обоснована необходимость моделирования напряжённо-деформированного состояния ВДО на твёрдой поверхности с целью обеспечения необходимой прочности конструкции.

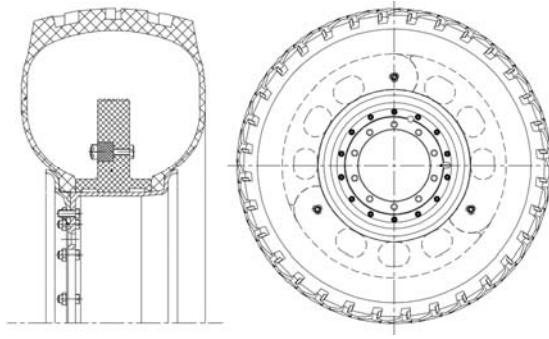


Рис. 2. Схема безопасного колеса с ВДО

В заключении главы, на основе выполненных исследований, были сформулированы задачи, решению которых посвящены дальнейшие главы диссертации.

Во второй главе описана методика создания безопасного колёсного движителя, оборудованного ВДО. Обоснован подход к проектированию конструкции колеса и выбору комплектующих. Даны рекомендации по выбору геометрических размеров ВДО, обеспечивающих работоспособность конструкции. Рассмотрены параметры, характеризующие процесс движения ВДО и его взаимодействие с шиной.

Отдельное внимание уделено оценке влияния трения в контакте между шиной и ВДО на силовую и тепловую нагруженность колеса. Трение в контакте ВДО и шины возникает по причине разности в длинах беговых дорожек шины и ВДО. Так как частота вращения шины равна частоте вращения ВДО вследствие надёжной фиксации обоих изделий на ободе, за один оборот точки на внутренней поверхности шины и внешней поверхности ВДО проходят разные расстояния, что приводит к взаимному скольжению конструкций с трением (см. Рис.3)

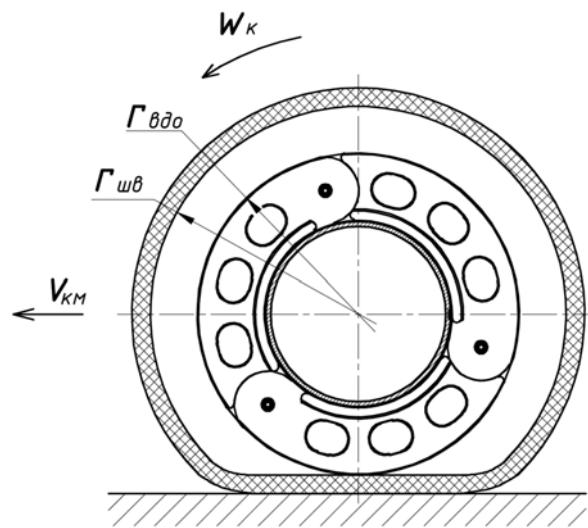


Рис. 3. Колесо с ВДО без избыточного давления вшине

Приведена зависимость для определения работы силы трения в контакте между ВДО и шиной за один оборот колеса:

$$A_{\text{tp}} = 2\mu P_z \pi (r_{\text{шв}} - r_{\text{ВДО}}),$$

а также зависимость для определения мощности потерь в контакте, обусловленной взаимным скольжением с трением ВДО и шины.

$$P_{\text{tp}} = \frac{\mu v_{\text{км}} P_z (r_{\text{шв}} - r_{\text{ВДО}})}{r_{\text{св}}},$$

где  $P_z$  – вертикальная нагрузка на колесо,  $\mu$  – коэффициент трения между материалами ВДО и шины,  $r_{\text{ВДО}}$  – внешний радиус ВДО,  $v_{\text{км}}$  – скорость движения колёсной машины,  $r_{\text{св}}$  – свободный радиус колеса,  $r_{\text{шв}}$  – внутренний радиус шины.

Обоснован подход к выбору материала ВДО и описанию его математической модели. Предложено использование полиуретана в качестве материала для ВДО. Основная сложность при моделировании материала, допускающего большие упругие деформации (гиперупругого), заключается в отсутствии достаточной адекватности результатов расчёта при применении классических уравнений теории упругости, дающих точное решение лишь при малых деформациях материала. Для получения приемлемой точности результата расчетов подобных конструкций обоснована возможность использования в качестве модели материала двухпараметрической модели гиперупругого материала Муни-Ривлина. Для описания механики поведения данного материала используется следующее выражение упругого потенциала:

$$\Psi = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2;$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2;$$

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3,$$

где  $\Psi$  – функция энергии деформации,  $d$  – критерий несжимаемости материала,  $J$  – мера объёмной деформации,  $C_{10}$ ,  $C_{01}$  – константы Муни-Ривлина, характеризующие деформацию,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  – главные кратности удлинений материала,  $I_1$ ,  $I_2$  – инварианты деформации. Данная модель содержит три параметра, определяемых экспериментально – это  $C_{10}$ ,  $C_{01}$  и  $d$ , причём

$$d = \frac{(1-2\mu)}{(C_{10} + C_{01})},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона выбранного материала.

Обоснованы режимы нагружения ВДО. Представлены расчетные схемы одиночного колеса, оборудованного ВДО, при нагружении вертикальной и совместном воздействии вертикальной и боковой нагрузок. При поверочном расчёте ВДО выделяется режим воздействия максимальной вертикальной нагрузки при наезде на препятствие (Рис. 4, а) и режим движения на повороте на грани опрокидывания (Рис. 4, б). Выдвинуто допущение о незначительности силы трения в контакте ВДО и шины по отношению к другим нагрузкам, действующим на ВДО в процессе движения.

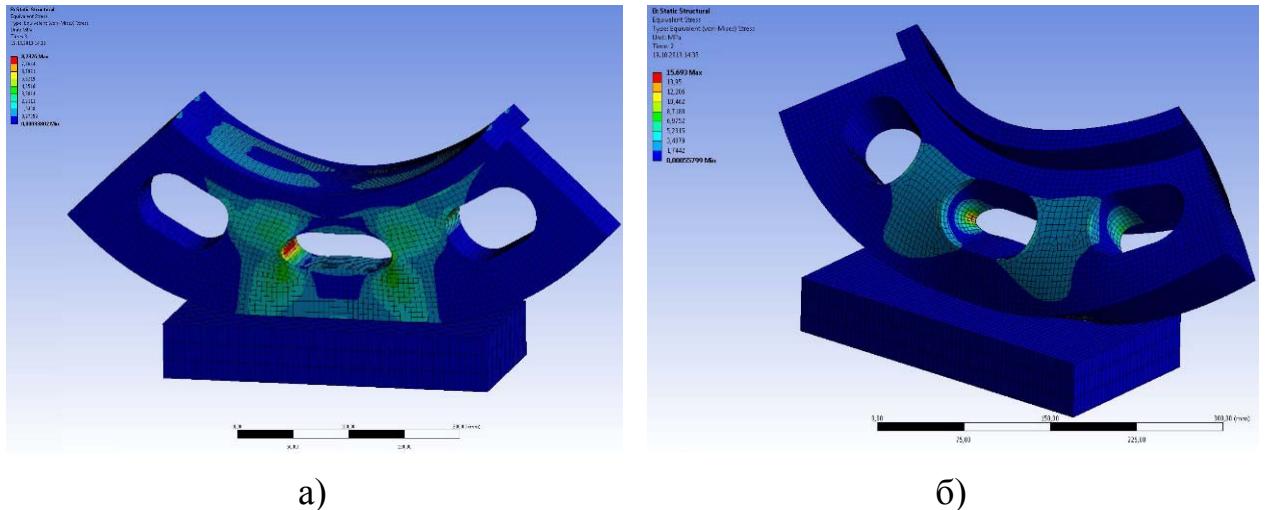


Рис. 4. Результаты расчёта ВДО при воздействии: а – вертикальной; б – совместном воздействии вертикальной и боковой нагрузок

Установлено, что к разрушению ВДО может привести деградация материала, возникающая вследствие превышения температуры конструкции предельного для эластомера значения. Обоснована связь тепловыделения в ВДО с внутренними гистерезисными потерями в материале конструкции, которые в свою очередь прямо пропорциональны скорости деформации и величине приложенной нагрузки. Частота приложения нагрузки может быть определена по формуле:

$$n = \frac{\nu_{km}}{2\pi r_{cw}}.$$

Величина нагрузки связана с эквивалентными напряжениями, возникающими в конструкции при её приложении. Таким образом пробег ВДО (количество циклов нагружения до разрушения) – есть функция от частоты нагружений и максимальных допустимых напряжений, которые для конкретного режима работы ВДО требуется определить экспериментальным методом. Описана экспериментальная методика определения предельных значений напряжений для конкретного режима работы. Данная методика основана на проведении испытаний при циклическом нагружении вертикальной силой экспериментального образца материала цилиндрической формы. Величина приложенной вертикальной нагрузки определяется таким

образом, чтобы давление на образец испытательной машиной соответствовало вычисленным для реальной конструкции максимальным напряжениям. Перед испытанием задаётся значение напряжения и вычисляется соответствующая ему вертикальная нагрузка. Далее проводится испытание, в процессе которого регистрируется температура испытуемого образца в зависимости от количества циклов. При превышении температурой образца критического для материала значения, испытания останавливаются и повторяются при сниженном значении нагрузки. В случае, если по преодолении заданного количества циклов температура образца не достигает значения на 10% меньше критического, предлагается повторить испытания при увеличенной нагрузке. Таким образом, определяется значение максимальных эквивалентных напряжений для требуемого режима работы ВДО.

Сформулированы подходы к проведению оптимизации конструктивных параметров ВДО. На первом этапе предлагается определить конструктивный облик опоры. Оптимизацию ВДО целесообразно проводить путём выбора оптимальных геометрических параметров её идеализированной модели. Для этого предлагается использовать следующий алгоритм:

- 1) разработка параметрической твердотельной модели конструкции ВДО;
- 2) создание конечно-элементной модели для определения напряжённо-деформированного состояния;
- 3) проведение серии расчётов при варьировании геометрических параметров;
- 4) построение поверхности отклика – зависимости значения целевой функции от геометрических параметров и поиск оптимальных геометрических параметров.

В качестве расчётной схемы выбирается схема «а» на Рис. 3, так как предполагается, что большая часть движения проходит по прямолинейной траектории. Так как увеличение массы ВДО влечёт за собой увеличение массы колеса, а, следовательно, и неподрессоренной массы, момента инерции трансмиссии и полной массы колёсной машины, в качестве целевой функции выбирается зависимость массы изделия от конструктивных параметров, которую необходимо минимизировать. В качестве функционального ограничения выбрано непревышение эквивалентными напряжениями максимальных допустимых для данных условий эксплуатации. В качестве прямых ограничений выбираются характерные размеры элементов конструктивного облика ВДО (например, количество типовых отверстий в стенке ВДО, толщина стенки и характерный размер отверстия).

Предложенные зависимости и алгоритмы сведены в метод определения конструктивных параметров колесного движителя, оборудованного ВДО из полимерного композиционного материала (полиуретана).

В третьей главе описывается применение метода определения конструктивных параметров колесного движителя, оборудованного ВДО из полимерного композиционного материала, к созданию реальной конструкции для штурмового бронированного специального автомобиля малого класса шифр «Ансырь», разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Рис. 5).



Рис. 5. Штурмовой бронированный специальный автомобиль малого класса шифр «Ансырь»

В соответствии со сформулированным во второй главе методом описан выбор основных геометрических размеров ВДО. В качестве материала выбран полиуретан СКУ-ПФЛ-100. Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента трения между выбранным полиуретаном и материалом шины. При этом коэффициент трения определён как для взаимодействующих сухих поверхностей, так для поверхностей, смазанных лубрикантом Huskey Lube-O-Seal. Для сухой поверхности  $\mu_d = 0,99 \pm 0,122$ , в присутствии смазки  $\mu_g = 0,073 \pm 0,0046$ . Таким образом, экспериментально подтверждена незначительность силы трения в контакте ВДО и шины по сравнению с остальными силовыми факторами, действующими на опору при применении смазки.

В соответствии с методом проведены испытания образцов полиуретана с целью определения предельных эквивалентных напряжений для режима движения автомобиля со скоростью 30-40 км/ч (Рис. 6). Для данного режима движения определено предельное значение  $\sigma_p = 6,5$  МПа. Данное значение использовано в проектировочных расчётах ВДО (при проведении оптимизации).

Разработаны математические конечно-элементные модели для проведения оптимизации и поверочных расчётов конструкции колеса с ВДО (Рис. 7, а). Данные математические модели позволяют:

- 1) учесть особенности гиперупругого композиционного материала, влияющие на вид напряжённо-деформированного состояния ВДО;
- 2) получить распределение перемещений и эквивалентных напряжений в конструкции ВДО для оценки её прочности;

3) провести оптимизацию геометрических параметров ВДО из условий обеспечения достаточной прочности при минимуме массы.

В заключении главы приведена окончательная форма изделия в виде трёхмерной модели (Рис.7, б).



Рис. 6. Определение предельных эквивалентных напряжений для требуемого режима работы

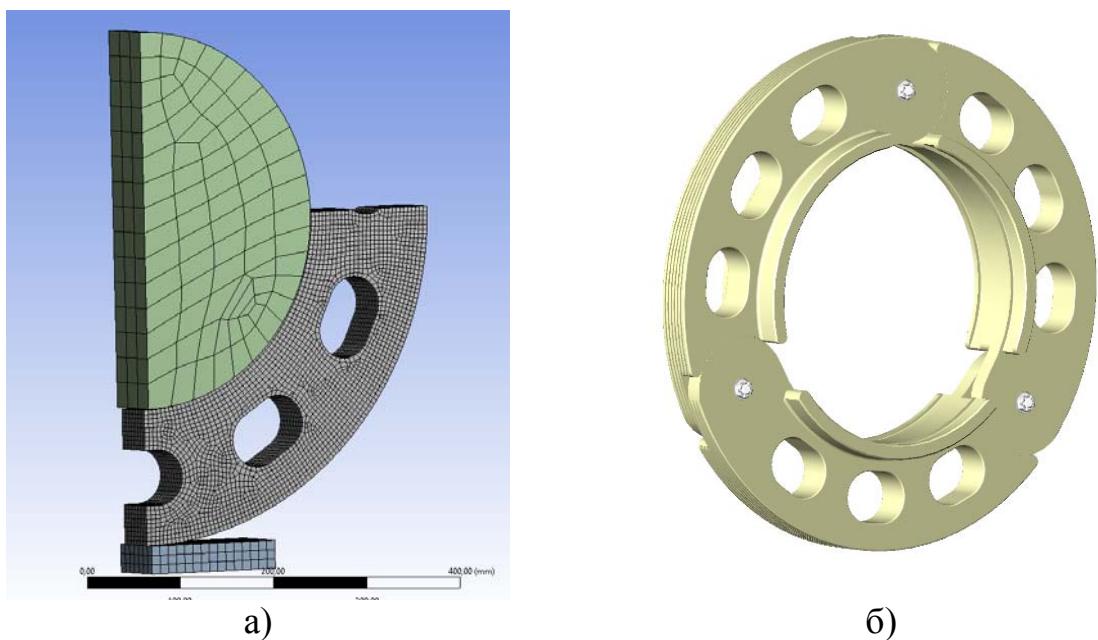


Рис. 7. а – конечно-элементная модель ВДО; б – трёхмерная модель ВДО

В четвертой главе диссертационной работы приводятся результаты экспериментальных исследований. Даётся подробное описание объектов исследований, аппаратурно-измерительного комплекса, условий и методики проведения экспериментов. На основании сравнения результатов натурных и численных экспериментов произведена оценка точности и адекватности математических моделей и методик.

Для проведения натурных испытаний был изготовлен макет колеса из полиуретана СКУ-ПФЛ-100, представляющий собой диск с просверленными в нём отверстиями, установленный на оси.

Для верификации математической модели материала было произведено определение напряжённо-деформированного состояния модели экспериментального образца, закреплённого на твёрдом основании, под воздействием вертикальной нагрузки, приложенной к его оси. Методом конечных элементов определены максимальные деформации в конструкции. Аналогичное испытание проведено и с натурным образцом. Установлено, что относительная погрешность результатов математического моделирования и натурного эксперимента по определению максимальной деформации в конструкции не превышает 13%.

Далее, была проведена проверка работоспособности методики определения напряжений, возникающих в ВДО, изготовленной из эластомера, допустимых для обеспечения работы в заданных условиях эксплуатации. Для имитации работы ВДО создана установка, приведённая на Рис. 8 и представляющая собой специально переоборудованный для испытаний токарный станок. Ось опытного образца приводится во вращение с помощью патрона и поджимается задней бабкой для исключения консольного приложения радиальной нагрузки. В суппорте станка на подшипниковой опоре установлен ролик. При перемещении суппорта ролик может поджимать опытный образец и обкатывать его при вращении патрона. При этом величина поджатия образца может быть определена с точностью до 0,05мм. В процессе испытания вращающийся с установленной частотой образец поджимается роликом на величину, соответствующую максимальным допустимым для данной частоты вращения напряжением. При этом величина поджатия определяется расчётным методом.



Рис. 8. Изображение макета колеса: а – в видимом; б – инфракрасном диапазоне излучения

Проведённые испытания показали хорошую сходимость результатов, полученных на ротационном стенде и результатов, полученных на установке вертикального нагружения по количеству циклов до достижения предельной

температуры работоспособности материала; расхождение результатов не более 10%. Зависимости температуры образца при периодическом нагружении вертикальной силой и при проведении ротационных испытаний от количества циклов приведено на Рис. 9.

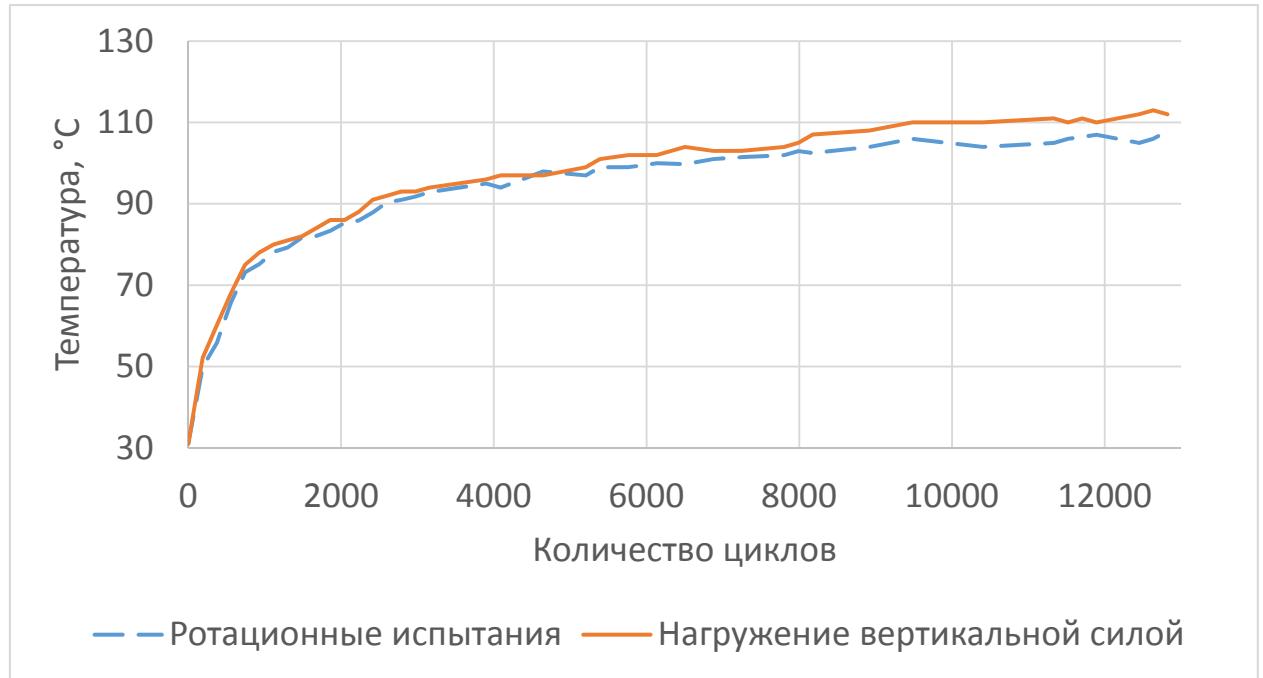


Рис. 9. Зависимость температуры образца от количества циклов

Второй эксперимент был посвящён определению коэффициента сопротивления качению колеса, оборудованного ВДО при отсутствии избыточного внутреннего давления в пневматическойшине при движении по твёрдой опорной поверхности. Для вычисления коэффициента сопротивления качению колеса в разных режимах работы была проведена серия опытов по определению силы на крюке при буксировании автомобиля, оборудованного опытными образцами ВДО (Рис.10).



Рис. 10. Определение сопротивления качению колёса

На основании результатов исследований была оценена мощность тепловыделения в колесе при движении без избыточного давления в шине. Произведён расчёт мощности тепловыделения при трении в контакте ВДО и

шины и оценён её вклад в общую тепловую нагруженность колеса. В результате эксперимента установлено значение коэффициента сопротивления качению колеса:  $f_{\text{ВДО}}=0,093$ . С учётом этого значения оценена мощность тепловыделения в колесе при движении без избыточного давления в шине:  $W_{\text{ВДО}}=15,4 \text{ кВт}$ .

Проведена экспериментальная оценка тепловой нагруженности безопасных колес и определение ресурса ВДО. Объектом натурных испытаний является штурмовой бронированный специальный автомобиль малого класса шифр «Ансырь», оборудованный шинами Michelin 11.00 R 16 XZL TL 135K MI и оснащенный внутренней опорой, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Колёсные машины». Испытания включают предварительный прогрев испытуемых шин при номинальном давлении и определение температурного поля шины, движущейся без избыточного давления с помощью тепловизора Fluke Ti27 из автомобиля, двигающегося совместно с испытуемым. Термограмма колеса при движении без избыточного воздушного давления в шине приведена на Рис. 11. Для обработки данных, получаемых в ходе испытаний, используется программа Fluke Smart View 3.5.

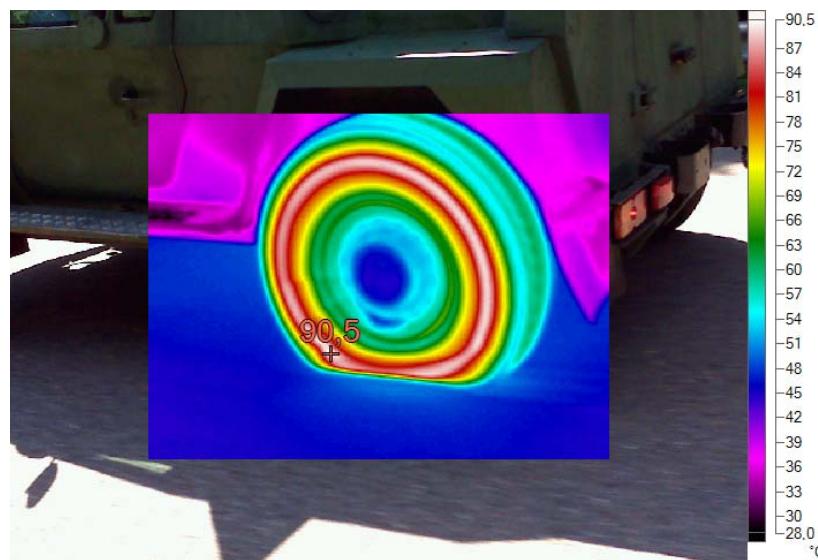


Рис. 11. Термограмма колеса с ВДО при движении без избыточного давления воздуха

В результате экспериментальных исследований получена зависимость температуры шины в разных областях от времени проведения испытания и сделаны выводы о динамике разогрева конструкции и тепловой нагруженности различных элементов шины при движении на ВДО.

В процессе испытаний ВДО была разрушена после преодоления расстояния в 46390 м. Данный ресурс превосходит установленное значение при определении максимальных допустимых для данного режима работы

эквивалентных напряжений на 20%, обеспечивая гарантированный запас при использовании разработанного метода.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

### Основные результаты

1. Разработаны математические модели колеса с ВДО, позволяющие учесть особенности гиперупругого композиционного материала и получить распределение перемещений и эквивалентных напряжений в конструкции ВДО, а также провести оптимизацию геометрических параметров ВДО из условий обеспечения достаточной прочности при минимуме массы. Адекватность математической модели подтверждена экспериментально. Относительная погрешность по основным показателям не превышает 13%.

2. Разработан метод, позволяющий провести синтез рациональной конструкции ВДО из композиционных материалов на основе полиуретана и спрогнозировать на стадии проектирования эксплуатационные свойства с учетом структурных особенностей и энергетических характеристик композиционного материала. Отличительными особенностями предлагаемого метода являются:

- рекомендации по определению параметров безопасного колеса, состава, материалов и комплектующих изделий на основе исходных данных, а также основных геометрических размеров ВДО, обеспечивающих максимальный пробег колёсного движителя;
- возможность оценить максимальные напряжения для заданных условий эксплуатации для выбранного материала ВДО;
- наличие оптимизационного цикла, который позволяет получить конструкцию движителя заданной грузоподъемности для требуемых условий эксплуатации;

3. Предложен способ экспериментального определения максимальной допустимой величины эквивалентных напряжений, при которой конструкция будет удовлетворять определённому в техническом задании пробегу с установленной скоростью движения.

4. Проведение натурных испытаний опытного образца безопасного колеса с ВДО, созданного в соответствии с методом, доказало его работоспособность при создании подобных конструкций. Экспериментальные «пробеги» колёсной машины на ВДО превышают расчётные величины не более чем на 20% по пройденному пути.

5. Разработана методика определения коэффициента трения между материалами ВДО и шины. Определены коэффициенты трения для пары полиуретан-резина со смазкой и без неё. Установлено, что мощность

тепловыделения в результате трения в контакте ВДО и шины не превышает 10% от определённой расчётно-экспериментальным методом мощности потерь в колесе, движущемся без избыточного внутреннего давления на ВДО.

### Основные выводы

Использование движителя с ВДО позволит повысить безопасность колёсных машин, в особенности имеющих специальное назначение за счёт следующих преимуществ:

1) применение в колёсном движителе ВДО из эластомера с использованием разработанного метода позволяет сохранить подвижность колёсной машины при падении избыточного давления в газонаполненной оболочке колеса вплоть до нуля или при полном разрушении шины и обеспечить колёсной машине возможность передвижения до места стоянки и ремонта;

2) наибольшей эффективности колёсного движителя, работающего без избыточного давления в газонаполненной оболочке колеса, удаётся добиться при сохранении целостности шины. В связи с этим ВДО следует проектировать таким образом, чтобы обеспечить максимально возможный ресурс шины при работе колеса без избыточного воздушного давления;

3) ресурс ВДО непосредственно связан с режимом движения колёсной машины и зависит от скорости движения автомобиля и нагрузки на колесо. Отказ конструкции происходит в результате разрушения в областях, где температура превышает допустимый для материала максимум, вследствие гистерезисных явлений в ВДО и шине, а также в результате их относительного скольжения.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Еремин Г.П., Карташов А.Б. Обзор и анализ современных конструкций колёсных вставок безопасности // Журнал Ассоциации Автомобильных Инженеров. 2014. Вып. 6 (95) С. 38-41 (0,8 п.л./1 п.л.)
2. Еремин Г.П., Карташов А.Б., Смирнов А.А. Экспериментальное исследование тепловой нагруженности безопасных колес // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. Вып. 4. С. 49-56. (0,6 п.л./0,75 п.л.)
3. Еремин Г.П., Карташов А.Б., Смирнов А.А. Расчетно-экспериментальный метод определения конструктивного облика колесных вставок безопасности // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2015. Т.1. Вып. 3, С. 37-45. (0,55п.л./0,69 п.л.)
4. Еремин Г.П., Карташов А.Б. Теоретическая оценка работоспособности перспективных конструкций непневматических шин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронное издание. 2013. Вып. 10 (10), С. 1-9 (0,4п.л./0,56 п.л.)
5. Разработка многоцелевых колёсных движителей с внутренней колёсной опорой / Еремин Г.П., Карташов А.Б., Смирнов А.А.. // Проблемы шин и резинокордных композитов. XXVI симпозиум. М.: Научно-технический центр «НИИШП». 2015. С. 124-131. (0,35 п.л./0,44 п.л.)
6. Колесо, содержащее герметичный обод и пневматическую бескамерную шину, в полости которой установлена охватывающая обод упругая разборная поддерживающая опора с кольцевой направляющей: патент 2550391 РФ / А.А. Ефремов, Г.О. Котиев, А.Б. Карташов, Г.П. Еремин, И.З. Дашибаев, И.Ю. Гашков, С.З. Дашибаев заявл. 23.01.2014; опубл. 10.05.2015. Бюлл.№13