

На правах рукописи

Карташов Александр Борисович

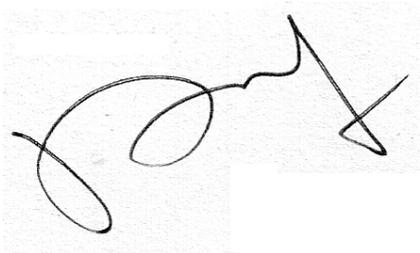
**РАЗРАБОТКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОЛЕСНЫХ  
ДВИЖИТЕЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА**

Специальность 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2010

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

Научный руководитель: доктор технических наук Даштиев И. З.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Балабин И. В.

доктор технических наук, профессор

Белкин А. Е.

Ведущая организация:

ОАО «ЦНИИСМ»

(Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения)

Защита диссертации состоится "11" октября 2010 г. в 14<sup>30</sup> 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.

Автореферат разослан "07" сентября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Гладов Г.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проведенный анализ современных транспортных средств показал, что в настоящее время наиболее рациональное направление решения задач перевозок тяжеловесных крупногабаритных и неделимых грузов на местности, когда нецелесообразно строить дороги, – это создание специальных транспортных средств с крупногабаритными колесами с целью увеличения проходимости.

Среди конструкций крупногабаритных колесных можно выделить: крупногабаритные шины низкого давления типа сверхбаллон, металлоупругие колеса большого диаметра и безвоздушные колесные движители из композиционных материалов.

Шины-сверхбаллоны имеют тонкослойный каркас с неглубоким эластичным протектором. Наружный диаметр достигает 3 м и более, внутреннее давление составляет от 0,02 МПа до 0,17 МПа. Увеличение наружного диаметра колесного движителя наряду с повышением проходимости в этих конструкциях приводит к значительному возрастанию массы и момента инерции колеса, а также к сложности и трудоемкости монтажа и демонтажа.

Идея создания крупногабаритных металлоупругих колес периодически возникала, обсуждалась, но так и не была реализована в силу целого ряда причин, главной из которых является отсутствие эффективных алгоритмов расчета и проектирования этих оригинальных конструкций. Применение крупногабаритного стального обода повлечет за собой неминуемое увеличение массовых показателей, а обеспечение демпфирующих свойств такого колеса будет непростой задачей.

Перспективные исследования направлены на создание безвоздушных колесных движителей из композиционных материалов. Основное преимущества таких движителей – это меньшая масса колеса по сравнению с аналогичными конструкциями, большая надежность вследствие отсутствия герметичной газовой оболочки и потенциальная возможность уменьшить сопротивление качению за счет уменьшения внутренних потерь и, в тоже время, возможность обеспечения необходимого уровня демпфирования колебаний (см. рис. 1).

Применение безвоздушных упругих колес большого диаметра (до 4,5 м) из композиционных материалов на основе стеклопластика позволит создать колесные движители, которые при той же грузоподъемности, что и аналоги, обладают меньшей массой, имеют меньшее сопротивление качению и более просты в эксплуатации.

В этой связи, разработка метода проектирования колесных движителей из композиционных материалов, который позволит оценить кинематические, силовые и энергетические характеристики движителя, как в статических режимах, так и при движении, представляется актуальной задачей.

Решение этой задачи обеспечит возможность эффективного проектирования транспортных систем с колесным движителем из полимерных композиционных материалов для выполнения транспортировок крупногабаритных неделимых грузов на местности в условиях бездорожья.

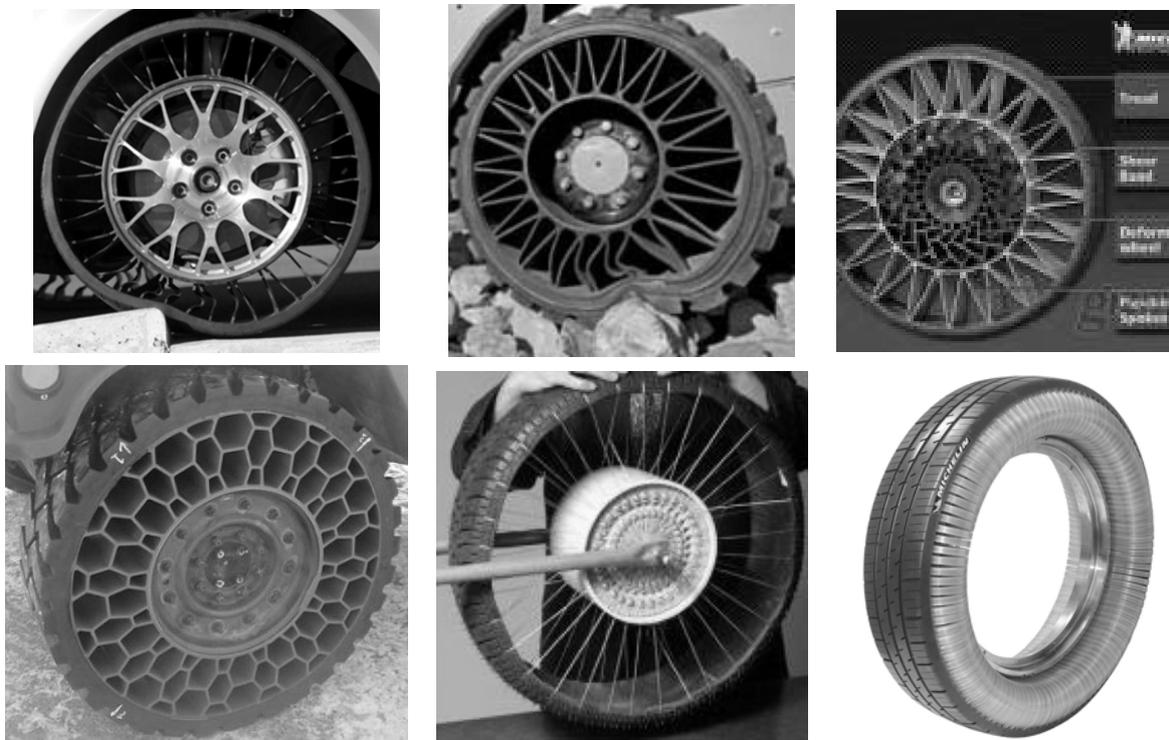


Рис. 1. Современные безвоздушные колесные движители

Цель работы. Совершенствование крупногабаритных колесных движителей из композиционных материалов на основе стеклопластика путем оптимизации конструктивных параметров.

Для достижения цели в диссертации обоснованы и решены следующие задачи:

- 1) разработана математическая модель движения колеса из композиционных материалов на основе стеклопластика по твердому опорному основанию;
- 2) проведены экспериментальные исследования с целью определения адекватности и точности математической модели;
- 3) разработан метод определения конструктивных параметров колесных движителей из композиционных материалов на основе стеклопластика;
- 4) проведена оптимизация конструктивных параметров крупногабаритного колесного движителя заданной грузоподъемности из композиционных материалов на основе стеклопластика.

Методы исследований. Исследования проводились с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и методов оптимизации. Эксперименты выполнены на стенде «Грунтовой канал» кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Научная новизна, основные положения которой выносятся на защиту, заключается:

- в разработке математической модели колеса из композиционного материала на основе стеклопластика, которая позволяет оценить кинематические, силовые и энергетические характеристики движителя, как в статических режимах, так и при движении по твердой опорной поверхности, достаточная точность математической модели движения колеса подтверждена экспериментально. Особенностью модели является то, что моделирование осуществляется решением контактной задачи, с учетом структурных особенностей материала и гистерезисных потерь в ободу колеса.

- в разработке метода проектирования крупногабаритных колесных движителей из композиционных материалов на основе стеклопластика, отличающегося наличием цикла оптимизации основных конструктивных параметров, направленной на минимизацию давления на опорное основание при заданном уровне допускаемых напряжений.

Практическая ценность. На основе результатов выполненных исследований для практического использования создан комплекс программ для ЭВМ, предназначенный для расчета крупногабаритных колесных движителей из композиционных материалов на основе стеклопластика. Комплекс позволяет оценить кинематические, силовые и энергетические характеристики движителя, как в статических режимах, так и при движении, включает оптимизацию основных конструктивных параметров с целью минимизации давления на опорное основание, оценки сопротивления движению (гистерезисных потерь) при заданном уровне допустимых напряжений в стеклопластиковом ободе.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в ОАО «ЦНИИСМ» (Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения), которое является ведущим предприятием России в области проектирования и производства конструкций из современных полимерных композитных материалов для ракетно-космической техники, транспортного, энергетического, нефтехимического машиностроения и других отраслей промышленности, и используется в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре СМ-10 «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

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

- на научно-технических семинарах кафедры СМ-10 колесных машин МГТУ им. Н. Э. Баумана 2007...2010 гг. (Москва);

- на международном научном симпозиуме «Автотракторостроение-2009», (Москва, 2009);

- на всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию начала подготовки инженеров автомобильной специальности в МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2009);

- на всероссийской молодежной научно-технической конференции «Авто-НН-2009» НГТУ им. Р. Е. Алексеева (Нижний Новгород, 2009).

Публикация. По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 149 листах машинописного текста, содержит 61 рисунок, 14 таблиц. Библиография работы содержит 137 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования: разработка метода проектирования крупногабаритных колесных движителей на основе стеклопластика, который позволит оценить кинематические, силовые и энергетические характеристики движителя, 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 повышения проходимости, проводится анализ современных вездеходных транспортных средств (ВТС). Особое внимание уделяется транспортным средствам на воздушной подушке, гусеничным и колесным ВТС, включая вездеходы на резинометаллических и пневмогусеницах.

Приведены примеры конструктивных решений крупногабаритных колесных движителей и принципиальная схема колесного движителя из композиционных материалов на основе стеклопластика.

Для достижения поставленной цели в диссертации были проанализированы и изучены работы, которые можно разделить на 2 группы:

1) работы, посвященные исследованию гибких тонкостенных элементов, механики и методам расчета свойств композиционных материалов: В. В. Васильева, В. Л. Бидермана, Б. Е. Победря, А. А. Ильюшина, Н. А. Малинина, Дж. Мейза, А. Нашифа, Ю. Н. Роботнова, Н. А. Алфутова, С. П. Тимошенко, К. Бицено, А. С. Вольмира, Т. Кармана, А. Н. Крылова, К. Маргерра, О. Зенкевича, В.С. Цыбина, Б. А. Афанасьева, И. З. Даштиева и др;

2) работы, посвященные исследованию свойств деформируемого колеса и его движению по твердой и деформируемой опорной поверхности: Е. А. Чудакова, В. И. Кнороза, В. А. Петрушова, Я. С. Певзнера, М. В. Келдыша, Н. А. Фуфаева, В.С. Гоздека, К. А. Тычина, А. Е. Белкина, О. А. Одинцова, Б. Л. Бухина, О. Н. Мухина, Е. Фиала, Я. С. Агейкина, В. В. Ларина, А. А. Хачатурова, Н. Ф. Бочарова, И. В. Балабина, В. Н. Наумова, С. Д. Попова, Ю. Л. Рождественского, К. Ю. Машкова, М. П. Чистова, Ю. В. Пирковского, С. Б. Шухмана и др.

В целом изучены труды научных школ МВТУ, НАМИ, НАТИ, МАДИ, МАМИ, Академии БТВ, 21НИИИ МО РФ.

Рассмотрены современные подходы описания анизотропии механических свойств ориентированного композиционного материал. Проведен анализ численных методов моделирования движения одиночного колеса.

Установлено, что наибольшие радиальные деформации колесный движитель из композиционных материалов на основе стеклопластика (или упругое стеклопластиковое колесо – УСК), нагруженный вертикальной силой, испытывает при движении по твердой опорной поверхности. Напряженно-деформированное состояние стеклопластикового обода в таких условиях характеризуется максимальными возможными при эксплуатации движителя эквивалентными напряжениями. В этой связи, с целью обеспечения необходимой прочности моделирование движение колеса целесообразно проводить на твердой опорной поверхности. Максимальные допустимые эквивалентные напряжения при этом определяются способностью стеклопластика сопротивляться циклическим нагрузкам.

В заключение главы были вынесены основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели работы – совершенствования крупногабаритных колесных движителей из композиционных материалов на основе стеклопластика путем оптимизации конструктивных параметров.

Во второй главе представлена расчетная схема движения одиночного УСК, рассмотрены параметры характеризующие процесс качения одиночного колесного движителя. Описана математическая конечно-элементная модель движения УСК, общий вид которой показан на рисунке 2.

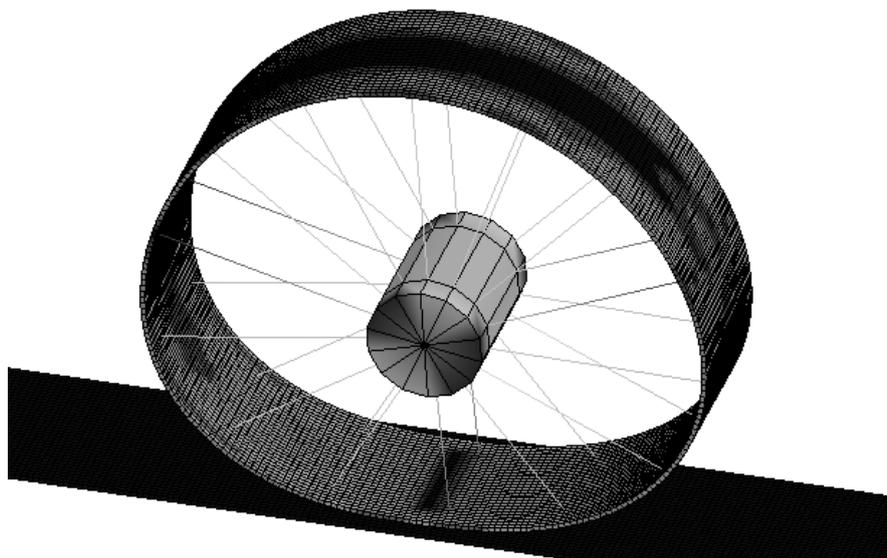


Рис. 2. Общий вид конечно-элементной модели УСК

Для крупногабаритного УСК, изготовленного по методу «намотки» принята модель ортотропного материала, обладающая симметрией относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей. Упругие свойства ортотропной среды описываются девятью независимыми постоянными.

Упругие постоянные и пределы прочности композита с типовой структурой определяются при соответствующих испытаниях однонаправленных плоских, кольцевых или трубчатых образцов, изготовленных тем же технологическим методом, что и рассматриваемая конструкция.

Предлагаемый материал стеклопластикового обода представляет собой совокупность однонаправленных слоев с различной ориентацией волокон. В слоистых композитах слою с углом армирования  $+\varphi$  (см. рис. 3), соответствует такой же слой с углом армирования  $-\varphi$ . Такие два слоя естественно считать при расчете как один симметрично армированный слой (см. рис. 3).

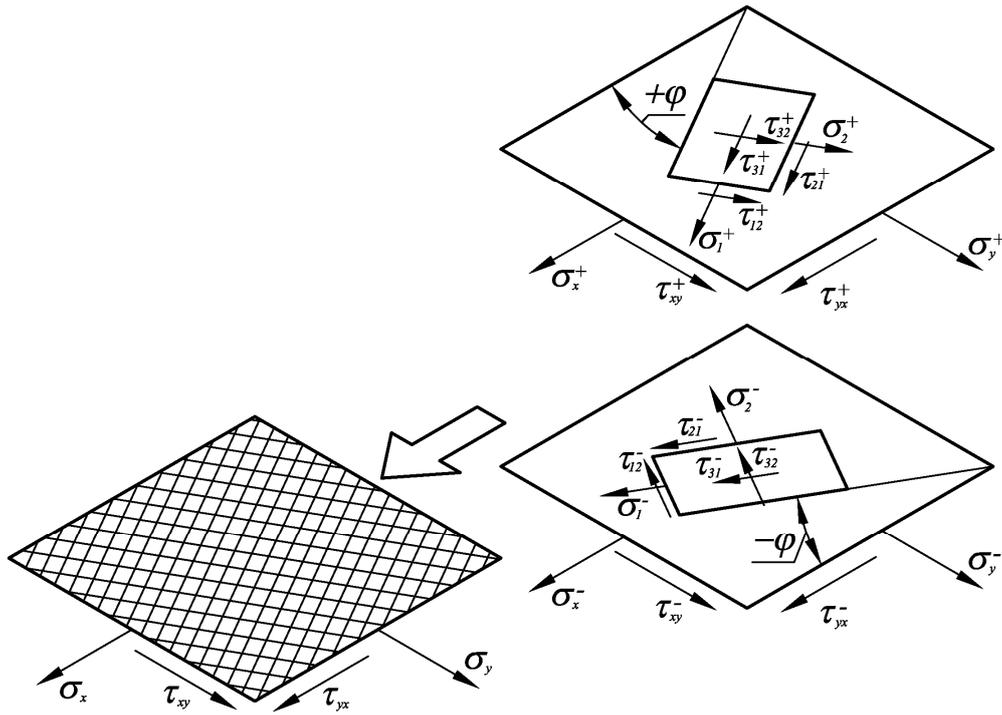


Рис. 3. Симметрично армированный слой

Усредняя напряжения для пары слоев ( $\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_x^+ + \sigma_x^-)$ ;  $\sigma_y = \frac{1}{2}(\sigma_y^+ + \sigma_y^-)$ ;  $\tau_{xy} = \frac{1}{2}(\tau_{xy}^+ + \tau_{xy}^-)$ ), в соответствии с рисунком 4, закон Гука для слоистого композита, можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y}; \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}, \quad (1)$$

где  $E_x = A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}}$ ;  $E_y = A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}}$ ;  $G_{xy} = A_{33}$ ;  $\mu_{yx} = \frac{A_{12}}{A_{11}}$ ;  $\mu_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}}$ ;

$$\bar{E}_1 = \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}; \quad \bar{E}_2 = \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}};$$

$$A_{11} = \bar{E}_1 \cos^4(\varphi) + \bar{E}_2 \sin^4(\varphi) + 2(\bar{E}_1 \mu_{21} + 2G_{12}) \sin^2(\varphi) \cos^2(\varphi);$$

$$A_{12} = A_{21} = \bar{E}_1 \mu_{21} + [\bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2(\bar{E}_1 \mu_{21} + 2G_{12})] \sin^2(\varphi) \cos^2(\varphi);$$

$$A_{22} = \bar{E}_1 \sin^4(\varphi) + \bar{E}_2 \cos^4(\varphi) + 2(\bar{E}_1 \mu_{21} + 2G_{12}) \sin^2(\varphi) \cos^2(\varphi);$$

$$A_{33} = (\bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2\bar{E}_1 \mu_{21}) \sin^2(\varphi) \cos^2(\varphi) + G_{12} \cos^2(2\varphi);$$

$E_1, E_2$  – модули упругости в направлениях 1, 2 соответственно;

$G_{12}$  – модуль сдвига в плоскости слоя;

$E_x, E_y$  и  $G_{xy}$  – средние модули упругости и модуль сдвига системы двух симметрично армированных слоев в осях  $x, y$ ;

$\mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{yx}, \mu_{xy}$  – коэффициенты Пуассона в соответствующих осях;

Таким образом, ортотропия механических свойств стеклопластикового обода оказывает значительное влияние на форму УСК под действием вертикальной нагрузки, определяя, тем самым, длину пятна контакта.

Кроме того для стеклопластиков характерно гистерезисное демпфирование. Неорганические оксиды, из которых состоит стекло, образуют различного вида пластичные структуры в зависимости от добавляемых в стекло элементов. В результате процессов релаксации, протекающих в пластических структурах, происходит рассеивание механической энергии.

Гистерезисные потери зависят от модуля сдвига в слое материала, т.е. в общем случае различны в разных направлениях. Такую особенность стеклопластика невозможно учесть, используя простую изотропную модель материала.

Для описания вязкоупругих свойств композитов создано большое количество аналого-механических моделей, связывающих между собой напряжения и деформации, достаточно простых: Гука, Ньютона, Максвелла, Фойгта, Кельвина и Зенера, так и более сложных с применением производных дробного порядка. Реализация этих моделей (см. рис. 4) возможно в современных программных комплексах анализа механики деформируемого твердого тела.

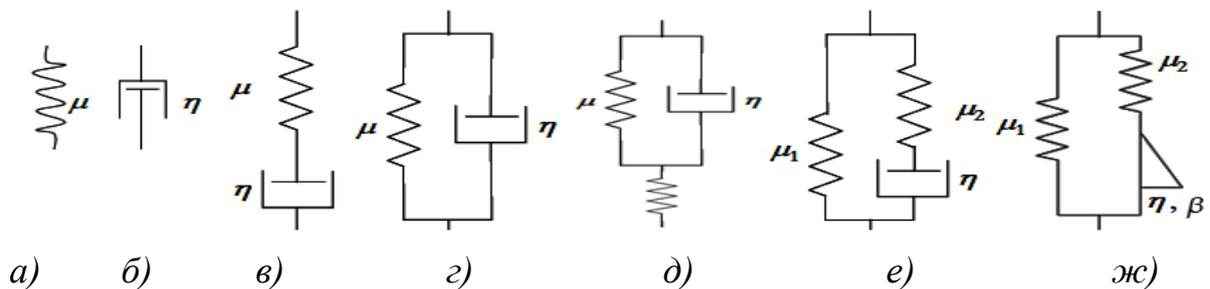


Рис. 4. Аналого-механические модели: а – Гука; б – Ньютона; в – Максвелла; з – Фойгта; д – Кельвина; е – Зенера; жс – обобщенная модель

После проведения ряда расчетных экспериментов с различными аналого-механическими моделями и сравнения с рядом литературных экспериментальных данных, была принята модель гистерезисного трения, в которой внутренние потери в материале моделируются введением дополнительных

упругопластических напряжений  $\sigma_d$ . Эти напряжения девиаторные, их значение определяется дополнительным модулем сдвига композиционного материала в слое  $G_d$  и некоторым пределом по эквивалентным напряжениям  $\sigma_Y$ . В элементарном виде для одноосного напряженного состояния определяющие соотношения для вычисления упругопластических напряжений можно записать в виде:

$$\sigma_d^{n+1} = (\sigma_d^n + G_d \cdot \Delta\varepsilon) \cdot \min\left(1, \frac{\sigma_Y}{\sigma_{eff}}\right), \quad (2)$$

где  $\sigma_d^n, \sigma_d^{n+1}$  – дополнительные упругопластические напряжения соответственно на  $n$  и на  $n+1$  шаге;

$\Delta\varepsilon$  – приращение деформации;

$\sigma_{eff}$  – эквивалентные напряжения по Мизесу.

Такая модель отличается от модели Зенера заменой диссипативного элемента с вязким трением на сухое (см. рис. 5).

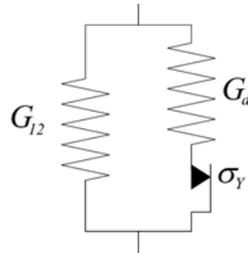


Рис. 5. Схема аналого-механической модели гистерезисного трения для обеспечения гистерезисного демпфирования в слое стеклопластикового обода

Необходимо отметить, что соотношение (2) определяют «элементарную» связь между напряжениями и деформациями при одноосном напряженном состоянии. При сложном напряженно-деформированном состоянии это соотношение несколько усложняется и записывается для каждого объемного конечного элемента (элементарного объема) модели движения УСК. В итоге интегральная характеристика внутренних потерь в конструкции имеет более сложный характер, не поддающийся аналитическому описанию.

Для определения значений параметров, входящих в выражение (2)  $G_d$  и  $\sigma_Y$  в работе проводится дополнительное экспериментальное исследование с образцом материала, применяемым для изготовления обода УСК.

Контактная задача взаимодействия обода УСК с твердым основанием решается с использованием расчетного модуля программного комплекса LS-Dуна, применяется контакт типа поверхность-поверхность, в основе которого лежит метод штрафных функций.

При задании трения в контакте, характеристика коэффициента трения  $\mu$  для каждой точки, вошедшей в контакт, в зависимости от скорости скольжения  $V_S$  определяется следующим выражением:

$$\mu = \mu_D + (\mu_S - \mu_D) e^{-D_c |V_S|}, \quad (3)$$

где  $\mu_S$  – коэффициент трения покоя;

$\mu_D$  – коэффициент трения скольжения;  
 $D_C$  – экспоненциальный коэффициент затухания.

Для определения входящих в уравнение (3) параметров достаточно иметь три пары экспериментальных значений коэффициента трения при соответствующей скорости скольжения.

Эпюры распределения напряжений по пятну контакта, полученные в результате математического моделирования для ведомого, свободного и ведущего режима качения УСК показаны на рисунке 6.

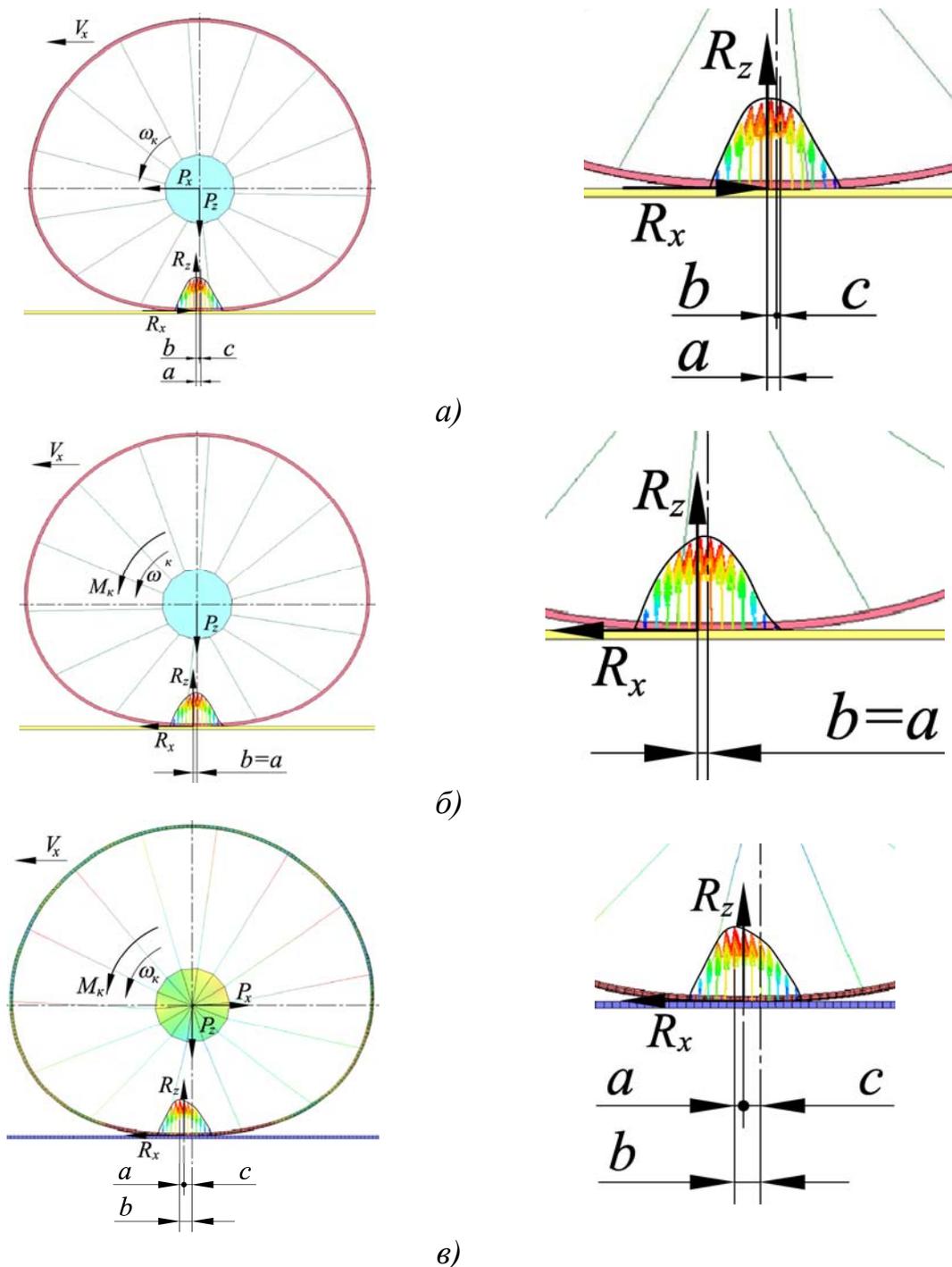


Рис. 6. Эпюры распределения напряжений по пятну контакта при движении УСК: *a* – ведомый режим; *б* – свободный режим; *в* – ведущий режим

Характеристики режимов качения УСК полностью согласуются с современными положениями теории движения колесных машин.

Таким образом, разработанная математическая модель движения колесного движителя из композиционного материала на основе стеклопластика позволяет:

- 1) учесть структурные особенности направленного композиционного материала, влияющие на форму деформированного обода и размеры пятна контакта;
- 2) оценить энергетические потери в стеклопластиковом ободе, возникающие при движении колеса;
- 3) получить распределение напряжений в пятне контакта;
- 4) определить значение и направление реакций в пятне контакта в любой момент времени;
- 5) получить распределение эквивалентных напряжений в стеклопластиковом ободе для оценки его прочности.

Адекватность и точность такой математической модели была подтверждена экспериментально.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований. Объект исследования: колесный движитель с ободом, выполненным из стеклопластика на основе жгута РБН со связующим ЭДТ-10, с внешним диаметром равным 340 мм, шириной 100 мм и толщиной 3 мм. Обод изготовлен методом спиральной намотки под углом 12,5 градусов к плоскости основания цилиндра. (см. рис. 7).

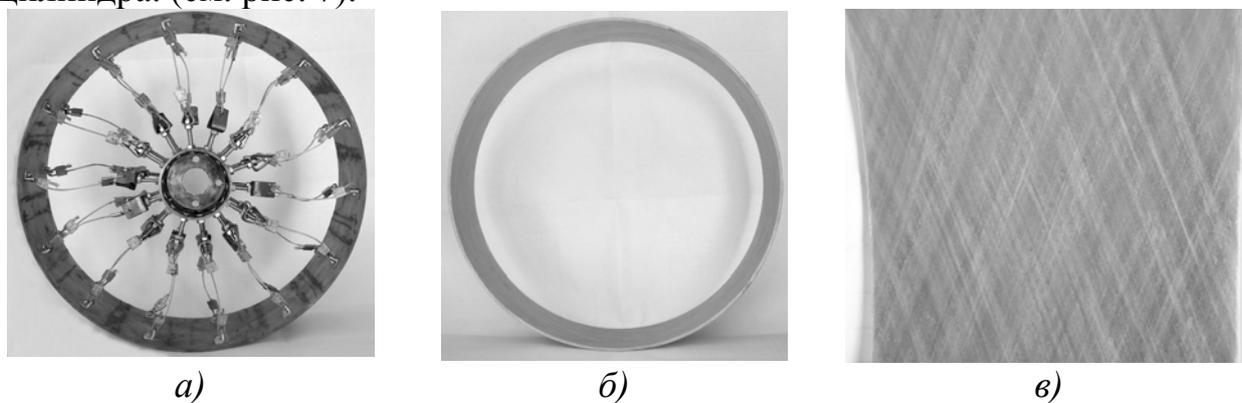


Рис. 7. Экспериментальный УСК: *а* – общий вид; *б* – стеклопластиковый обод; *в* – укладка стеклопластиковых волокон под углом 12,5°

Характеристики однонаправленного слоя материала предоставлены ОАО «ЦНИИСМ».

Эксперимент по определению кинематических, силовых и энергетических характеристик УСК проводился на стенде для исследования физических моделей и малоразмерных колесных движителей, разработанного на кафедре колесные машины" МГТУ им. Н. Э. Баумана. Схема стенда представлена на рис. 8.

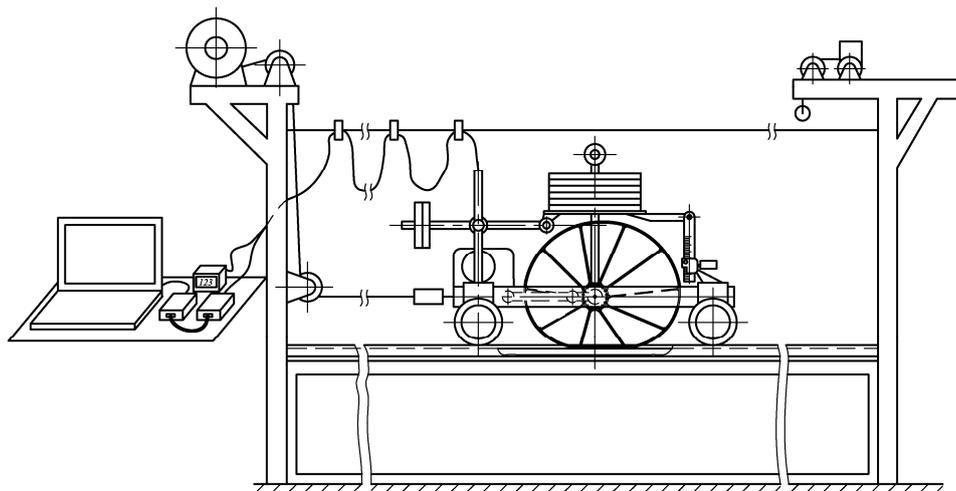


Рис. 8. Схема стенда для исследования характеристик качения колеса

Для регистрации продольного усилия использовался S-образный тензодатчик производства компании Vishay TedeA-Huntleigh с комбинированной погрешность измерения  $\pm 0,05\%$ , аналого-цифровой преобразователь сигнала Zet-210 с частотой дискретизации до 400 кГц, усилитель Zet-411 и портативная ЭВМ. Для регистрации и обработки сигналов использовалось программное обеспечение «ZETLab», входящее в комплект поставки модуля Zet-210. Изменение динамического радиуса качения УСК фиксировалось видео камерой, закрепленной на раме динамометрической тележки.

В результате экспериментальных исследований получено:

- 1) зависимость изменения коэффициента сопротивления качению от вертикальной нагрузки;
- 2) зависимость радиуса качения и динамического радиуса от вертикальной нагрузки;
- 3) зависимость изменения прогиба колеса от вертикальной нагрузки.

В заключение исследования проведена оценка относительной случайной погрешности эксперимента, которая не превышает 12 %.

Фотографии экспериментального УСК нагруженного нормальной силой 992Н представлены на рисунке 9.

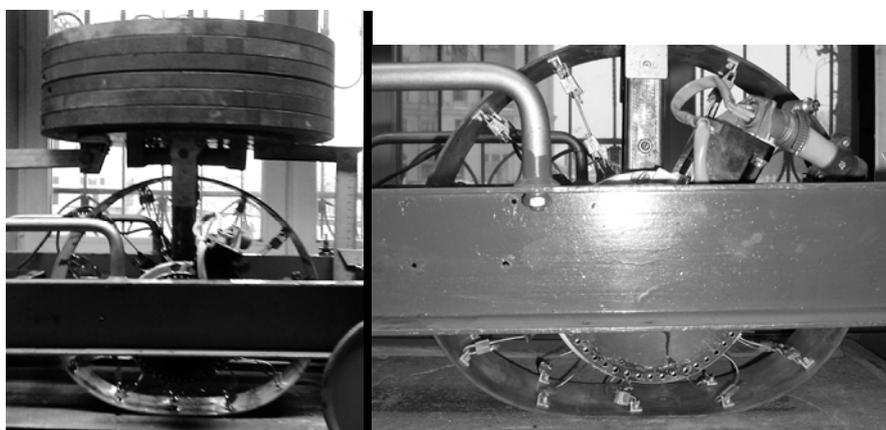


Рис. 9. УСК под нагрузкой 992 Н

График изменения коэффициента сопротивления качению УСК в зависимости от вертикальной нагрузки в сравнение с коэффициентом сопротивления качению пневматической диагональной шины аналогичного размера модели В-25 от спортивного карта представлен на рисунке 10.

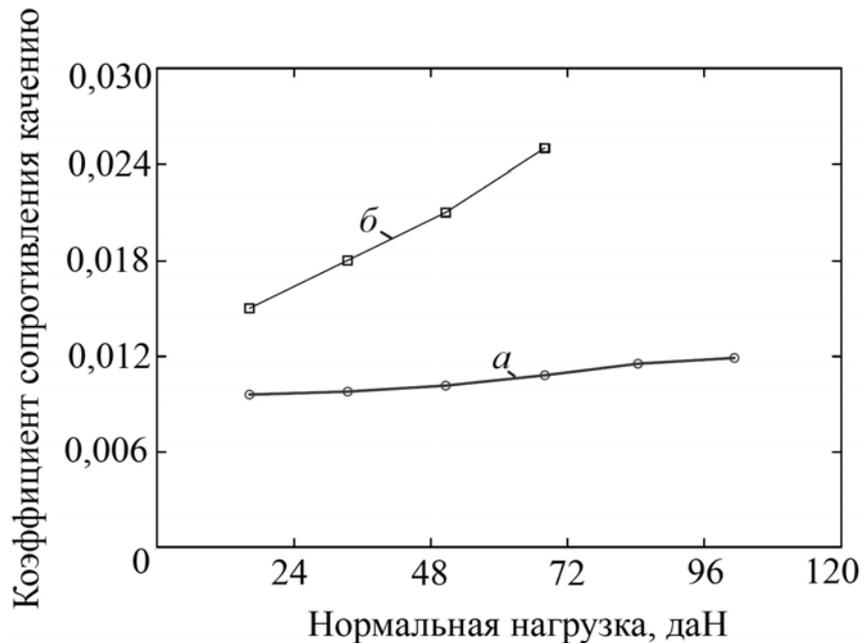


Рис. 10. Зависимость изменения коэффициента сопротивления качению от нормальной нагрузки: *a* –УСК; *б* –колесо с пневматической шиной аналогичного размера

После анализа представленной информации, делаются следующие выводы:

1) разработанная математическая модель позволяет оценить кинематические, силовые и энергетические характеристики колесного движителя из композиционного материала на стадии проектирования;

2) сопротивление качению УСК практически в 2 раза меньше сопротивления качению колеса с пневматической шиной и слабо зависит от вертикальной нагрузки, что свидетельствует о высокой эффективности применения УСК для транспортных систем.

В четвертой главе сформулирован метод создания крупногабаритных колесных движителей из композиционных материалов на основе стеклопластика. В представленном методе можно выделить следующие основные этапы проектирования УСК:

1) анализ исходных данных и определение габаритных размеров обода, ограниченных эксплуатационными условиями;

2) выбор композиционного материала и метода изготовления УСК;

3) выбор модели анизотропного материала (ортотропного или анизотропного);

4) создание конечно-элементной модели образца материала с целью уточнения упругих и демпфирующих характеристик;

- 5) задание прямых и функциональных ограничений конструктивных параметров УСК;
- 6) проведение оптимизационного цикла определения основных конструктивных параметров УСК с целью минимизации давления на твердое опорное основание;
- 8) проведения расчетов с целью определения сопротивления качению полученной «оптимальной» конструкции УСК на твердой опорной поверхности;
- 9) проведение спектрального анализа;
- 10) проведение расчетов на живучесть конструкции, путем оценки работоспособности УСК при удалении группы спиц.
- 11) создание опытного образца и проведение натурных испытаний.

Пятая глава диссертационной работы посвящена рассмотрению полного цикла определения конструктивных параметров УСК в соответствии разработанным методом, с более подробным описанием оптимизационных исследований.

В качестве примера выбрано транспортное средство на базе автомобиля «УРАЛ» для перевозки крупногабаритных труб (см. рис. 11), из конструктивных особенностей которого определяются следующие параметры движителя, работающего в ведомом режиме:

- наружный диаметр недеформированного обода определяется требованиями транспортировки УСК и составляет 4,5 м (в соответствии требованиями железнодорожного габарита 02-ВМ по ГОСТ 9238-83);

- ширина обода УСК определяется шириной транспортного средства для прохождения по мостам и составляет 1 м.

Вертикальная нагрузка на колесо в статическом состоянии не превышает 78480 Н (8000 кгс) и определяется полной массой трубы (22 т) в составе транспортного средства.



Рис. 11. Автопоезда – «Трубовоз»

Выбор допускаемых напряжений при циклическом нагружении определяется характеристиками сопротивления многоциклового усталости композита. Принимаются следующие допускаемые значения напряжений изгиба  $[\sigma]=400$  МПа при  $10^6$  циклов нагружения по данным ЦНИСМ. Полагая, что поло-

вина ресурса УСК находится под действием принятой нагрузки, назначенный ресурс УСК составит 28 тыс. км.

Оптимизационные исследования проводятся с помощью метода полиномиальной аппроксимации. В качестве целевой функции выбрано среднее давление в пятне контакта обода УСК с твердым опорным основанием. В качестве управляемых (варьируемых) конструктивных параметры УСК приняты:  $s$  – толщина обода УСК,  $n_{cn}$  – число спиц УСК и  $k_c$  – жесткость спиц УСК.

В результате проведенного цикла определения конструктивных параметров УСК получено (см. рис. 12):

- толщина стеклопластикового обода  $s \approx 17$  мм;
- количество упругих спиц  $n_{cn} = 21$ ;
- жесткость упругих спиц  $k_{cn} = 14763$  Н/м;
- вертикальные перемещения оси УСК при полной нагрузке  $U_z = 427$  мм;
- максимальные эквивалентные напряжения в ободу  $\sigma_{экв} = 163$  МПа.

Среднее нормальное давление в пятне контакта составило  $p_{cp} = 0,049$  МПа.

Полная масса колеса со стальной ступицей составила  $m_{УСК} = 920$  кг.

По результатам проведения спектрального анализа собственная частота вертикальных колебаний оси УСК составила 0,8 Гц при полной нагрузке.

Исследование живучести показало, что наиболее худший случай потери работоспособности конструкции – это выход из строя двух и более последовательных рядов спиц. Расчетный коэффициент сопротивления качению на твердом основании составил  $f_{УСК} = 0,013$  при полной нагрузке.

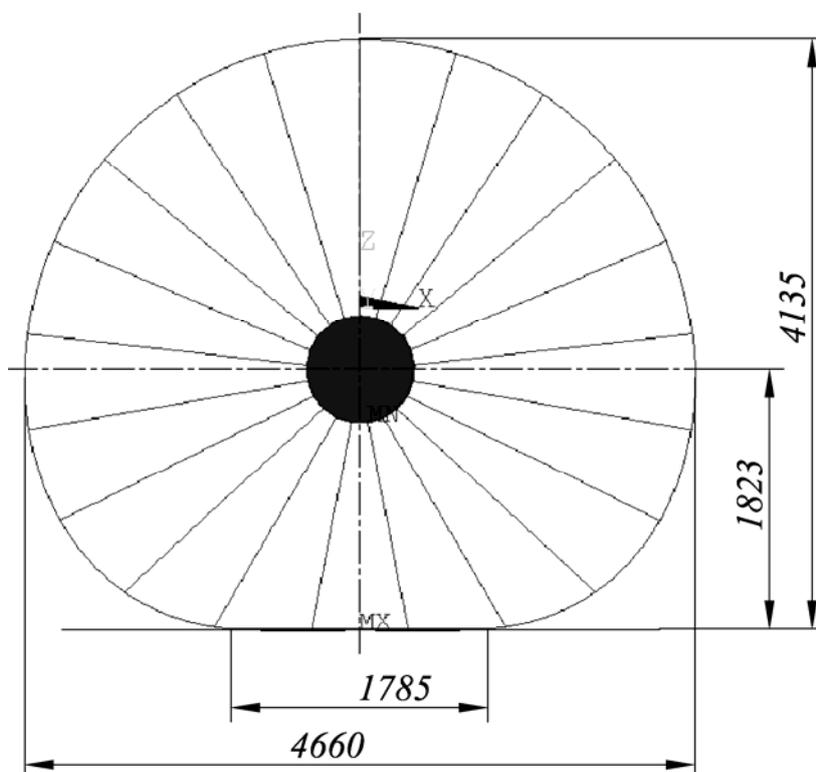


Рис. 12. УСК с конструктивными параметрами, полученными в результате оптимизационного цикла

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

### Основные результаты

1) Разработана математическая модель движения УСК по твердому опорному основанию, которая позволяет оценить кинематические, силовые и энергетические характеристики движителя.

2) Сравнением результатов численного математического моделирования и натурных экспериментов доказана адекватность разработанной математической модели движения колесного движителя из композиционных материалов на основе стеклопластика по ровному твердому горизонтальному опорному основанию с точностью, приемлемой для прогнозирования эксплуатационных характеристик движителя, и её пригодность для практического использования при создании крупногабаритных колесных движителей на основе стеклопластика. Относительная погрешность по основным показателям не превышает 14%.

3) Получено теоретически и доказано экспериментально, что изменение сопротивления качению УСК практически не зависит от вертикальной нагрузки при вертикальной деформации, не превышающей 20% от радиуса колеса.

4) Разработан метод, позволяющий провести синтез рациональной конструкции колесного движителя из композиционных материалов на основе стеклопластика и спрогнозировать на стадии проектирования его эксплуатационные свойства с учетом структурных особенностей и энергетических характеристик композиционного материала. Отличительными особенностями предлагаемого метода являются:

- возможность на стадии проектирования оценить сопротивление качению УСК;

- наличие оптимизационного цикла, который позволяет получить конструкцию движителя заданной грузоподъемности, необходимой усталостной прочности и оказывающую минимальное давление на опорное основание при заданной грузоподъемности;

- возможность оценить «живучесть» конструкции;

- провести спектральный анализ полученной конструкции и дать рекомендации по необходимому уровню диссипации энергии при вертикальных колебаниях оси УСК.

5) В ходе теоретических исследований и проведении оптимизации конструктивных параметров установлены наилучшие характеристики УСК диаметром 4,5 м и грузоподъемностью 8000 кг.

### Основные выводы

Использование УСК в качестве движителей для транспортных систем позволит повысить эффективность транспортных средств для перевозки крупногабаритных неделимых грузов на местности в условиях бездорожья за счет следующих преимуществ:

1) УСК обладают высокими показателями опорной и профильной проходимости, главным образом, за счет существенного увеличения наружного диаметра движителя;

2) УСК при полной нагрузке обладают существенно меньшим сопротивлением качению, чем аналогичные колесные движители на основе пневматической шины;

3) крупногабаритный движитель из композиционных материалов на основе стеклопластика при той же максимальной несущей способности, что и аналогичная шина, обладают значительно меньшей массой и моментом инерции;

4) применение УСК при создании вездеходного транспортного средства позволит отказаться от классической схемы системы поддрессоривания «двигатель-подвеска», а использовать упруго-демпфирующие свойства самого движителя.

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

1. Карташов А. Б. Моделирование движения колеса из композиционных материалов на основе стеклопластика методом конечных элементов // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров: Материалы 65-ой международной научно-технической конференции ААИ. Секция 1 – Автомобили, тракторы, их агрегаты и системы. Подсекция – Тракторы. – М., 2009. – С. 92 – 100.
2. Карташов А. Б., Котиев Г. О., Смирнов А. А. Расчетно-экспериментальный метод определения несущей способности колесного движителя из композиционных материалов на основе стеклопластика // Проектирование колёсных машин: материалы Всерос. науч.техн. конф., посвящ. 100-летию начала подготовки инженеров по автомобильной специальности в МГТУ им. Н. Э. Баумана, 25-26 нояб. 2009, г. Москва. – М., 2010. – С. 73 – 74.
3. Разработка бронетранспортера для внутренних войск / Г. О. Котиев [и др.] // Вопросы оборонной техники. – 2009. – Выпуск 5 – 6. – С. 38-41.
4. Карташов А. Б., Котиев Г. О., Смирнов А. А. Исследование режимов качения колеса из композиционных материалов на основе стеклопластика // Журнал Ассоциации Автомобильных инженеров. – 2009. – № 4 (57). – С. 40 – 43.
5. Карташов А. Б., Котиев Г. О., Смирнов А. А. Метод моделирования динамики колесной машины с движителем из стеклопластика // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. – 2010. – Специальный выпуск. – С. 138 – 144.