

На правах рукописи

УДК 629.373.3, 629.3.027.3

Староверов Николай Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ И
МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ЛИСТОВЫХ РЕССОР ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМАХ ПОДРЕССОРИВАНИЯ
КОЛЕСНЫХ МАШИН**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2011

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Даштиев И.З.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор

Полунгян А.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Горобцов А.С.

доктор технических наук,
профессор Наумов В.Н.

Ведущая организация: ОАО «АвтоВАЗ»

Защита диссертации состоится «17» октября 2011 г. в 14³⁰ 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 «13» сентября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1968739

Староверов Н.Н. Разработка

Сарач Е.Б.

См. кон-

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Особый класс транспортных средств занимают вездеходные транспортные средства (ВТС), предназначенные для эксплуатации в регионах с отсутствующей сетью дорог, в том числе, в регионах Крайнего Севера по грунтам со слабой несущей способностью. Движение иных транспортных средств в летнее время в этих регионах затруднено, а обслуживание нефтегазовых месторождений и трубопроводных систем транспортировки нефти и газа остается актуальной проблемой.

Разработка новых видов транспортных систем и управления этими системами, а также технологии экологически безопасной разработки месторождений и добычи полезных ископаемых являются одними из пунктов перечня «критических» технологий, имеющих важное социально-экономическое значение для обороны страны и безопасности государства, утвержденного распоряжением Правительства РФ № 1243-р 25 августа 2008 г.

Один из путей решения проблемы грузоперевозок в условиях бездорожья, движения по местности с высокими экологическими требованиями к неразрушению верхнего почвенного покрова состоит в разработке специальных ВТС на шинах сверхнизкого давления. При этом снижение снаряженной массы является одним из аспектов повышения их экономической эффективности. Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в системе поддрессоривания ВТС в этом случае предоставляет ряд серьезных преимуществ.

Проведенный анализ конструкций систем поддрессоривания современных транспортных средств показал, что композиционные материалы находят свое применение в бюджетных малолитражных и скоростных автомобилях, для которых снижение снаряженной массы является критическим показателем. Применение рессоры из ПКМ позволяет снизить массу упругого элемента в 3...5 раз, увеличить его живучесть, улучшить показатели плавности движения ВТС и снизить шум. При замене стальной многолистовой рессоры на рессору из ПКМ уменьшается масса неподдрессоренных частей автомобиля, уменьшается динамическая нагруженность подвески, улучшаются экономические показатели колесных машин (КМ).

Известны конструкции виброизоляторов на основе ПКМ и полимерных резиноподобных материалов. Однако, единого метода создания и прогнозирования упругодемпфирующих свойств таких элементов в составе систем поддрессоривания КМ не существует. Кроме того, определенной мерой демпфирования (сухого и пропорционального перемещению) обладает любая рессора. В работе рассматривается возможность использования гистерезисного демпфирования ПКМ в системе поддрессоривания ВТС.

Цели и задачи. Целью работы является снижение массы элементов ходовой части ВТС и достижение заданных показателей плавности движения

путем использования ПКМ в качестве упругих, демпфирующих и направляющих элементов систем поддрессоривания.

Для достижения поставленной цели были поставлены и последовательно решены следующие задачи:

- 1) для ВТС установлены требования к рессоре в отношении упругодемпфирующих свойств;
- 2) разработаны математические модели вязкоупругого поведения под нагрузкой одиночного стеклопластикового листа, межлистового полимерного материала и рессоры в сборе;
- 3) проведена верификация и определена степень точности математической модели путем сравнения с экспериментальными данными;
- 4) разработан метод определения качества системы поддрессоривания с упругодемпфирующими элементами в частотной области;
- 5) разработана нелинейная пространственная имитационная модель ВТС с упругодемпфирующими элементами системы поддрессоривания с учетом нелинейных свойств направляющего устройства системы поддрессоривания;
- 6) разработаны методы прогнозирования упругодемпфирующих свойств рессоры в составе системы поддрессоривания ВТС и моделирования ее механического поведения.

Методы исследований. Исследования проводились аналитически и с помощью имитационного математического моделирования движения колесной машины с использованием численных методов в пакете технических расчетов MATLAB и графической среде имитационного моделирования Simulink. Математические модели основываются на применении математического аппарата производных и интегралов дробного порядка, позволяющих наиболее точно воспроизводить результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования основывались на испытаниях рессор и их компонентов ВТС «ЗЭТ 6×6», разработанного на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана по заказу компании ОАО «АВТОРОС».

Научная новизна заключается:

- 1) в разработке математической модели многолистовой рессоры из ПКМ на основе стеклопластика с межлистовым полимерным материалом-заполнителем, позволяющей оценить упругодемпфирующие характеристики рессоры как в статических режимах, так и при динамическом нагружении случайного характера. Особенностью модели является применение дробно-дифференциальных уравнений, позволяющих наиболее точно отразить поведение реальных вязкоупругих материалов под нагрузкой, а также возможность решения задачи как во временной, так и в частотной области;

- 2) в разработке метода прогнозирования вязкоупругих свойств рессор из композиционных материалов на основе стеклопластика с межлистовым полимерным материалом-заполнителем. Особенностью метода является наличие оптимизационного цикла для получения требуемых показателей демпфирования.

Практическая ценность работы. На основе результатов выполненных исследований для практического использования создан комплекс программ для ЭВМ, предназначенный для исследования упругодемпфирующих свойств рессор из ПКМ на этапе проектирования без создания дорогостоящих единичных образцов. Разработанные математические модели, являющиеся базой комплекса программ, отличаются универсальностью и позволяют прогнозировать свойства рессор различной формы, состоящих из композиции нескольких материалов. Разработанный комплекс программ и метод прогнозирования упругодемпфирующих свойств и механического поведения рессор из ПКМ под нагрузкой позволит сократить сроки проектирования и доводочных испытаний. Научные положения диссертации обоснованы и подтверждены сопоставлением результатов расчетов с данными экспериментальных исследований.

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, ОАО «АвтоВАЗ», являющееся крупнейшим производителем легковых автомобилей в России и Восточной Европе, и используются 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

- 1) на научно-технических семинарах кафедры СМ-10 «Колёсные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2009...2011 гг. (г. Москва);
- 2) на НТС в ОАО «АвтоВАЗ» в 2011 г. (г. Тольятти);
- 3) на НТС в ОАО «ЦНИИСМ» в 2011 г. (г. Хотьково).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 научные работы в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 167 листах машинописного текста, содержит 80 рисунков, 28 таблиц. Библиография работы содержит 130 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования: возможность применения ПКМ в системах поддрессоривания специальных ВТС с целью использования гистерезисного демпфирования в качестве основного источника диссипации энергии в системе поддрессоривания ВТС, вследствие ограничения скорости до 50 км/ч, снижения снаряженной массы и массы недрессоренных частей ВТС; приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель и задачи работы и отражены основные положения, которые выносятся на защиту и сформулирована научная новизна работы.

В первой главе диссертации приведен анализ динамики систем поддрессоривания специальных ВТС с шинами сверхнизкого давления и сделан вывод о требуемой мере демпфирования таких ВТС. Объектом исследования является ВТС «ЗЭТ 6×6», разработанное в конструкторском бюро кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана по заказу компании ОАО «АВТОРОС» (www.z-project.ru). Общий вид ВТС представлен на рисунке 1. Технические характеристики ВТС приведены в таблице 1.



Рис. 1. Вездеходное транспортное средство «ЗЭТ 6×6» со стеклопластиковыми четверть-эллиптическими рессорами

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

- 1) работы, посвященные динамике, расчетам систем поддрессоривания и моделированию этих систем: Ротенберг Р.В., Савочкин В.А., Дмитриев А.А., Хачатуров А.А., Певзнер Я.М., Пархиловский И.Г., Жеглов Л.Ф., Полунгян А.А., Фоминых А.Б., Котиев Г.О., Сарач Е.Б., Reimpell J., Genta G., Morello L., Gillespie T.D., и др.;
- 2) работы, посвященные расчетам тонкостенных элементов из композиционных и конструкционных материалов, листовых рессор (стальных и из ПКМ) в пределах теории упругости: Васильев В.В., Алфутов Н.А., Победра Б.Е., Бидерман В.Л., Полилов А.Н., Савельев В.А., Даштиев И.З., Афанасьев Б.А.,

Цыбин В.С., Работнов Ю.Н., Мейз Дж., Колтунов М.А., Биргер И.А., Пановко Я.Г., Ржаницын А.Р., Пархиловский И.Г., Феодосьев В.И., Тимошенко С.П., Крылов А.Н. и др.;

3) работы, посвященные теориям пластичности, ползучести, вязкоупругости, реологии материалов и демпфированию колебаний: Ильющин А.А., Победра Б.Е., Малинин Н.Н., Качанов Л.М., Ржаницын А.Р., Бартенев Г.М., Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Фрейденталь А., Гейрингер Х., Нашиф А., Мальков В.М., Бленд Д., Виноградов Г.В., Малкин А.Я., Северс Е., Lakes R., Johnson W., Mellor P.B., Heymans N., Shahsavari R., Ulm F.J., Mainardi F., Gorenflo R., Piaras K. и др.;

4) работы, посвященные математическому аппарату применения дробного диффер-интегрирования: Учайкин В.В., Нахушев А.М., Самко С.Г., Килбас А.А., Васильев В.В., Podlubny I., Mainardi F., Gorenflo R. и др.

Таблица 1.

Технические характеристики ВТС «ЗЭТ 6×6»

№	Наименование показателя	Значение показателя
1	Полная масса, кг	3500
2	Неподдрессоренная масса одного колеса, кг	75
	Моменты инерции ВТС	
3	относительно продольной оси КМ x , кг·м ²	1010
4	относительно поперечной оси КМ y , кг·м ²	10012
5	относительно вертикальной оси z , кг·м ²	10310
6	База, мм	2375
7	Ширина колеи, мм	1890
8	Расстояние от передней оси до центра масс ВТС, мм	2328
9	Полный ход подвески, мм	300
	Шины «AVTOROS X-TRIM»	
10	Наружный диаметр, мм	1240
11	Нормальная жёсткость шины, Н/м	125020

В работе широко использовались труды научных школ МГТУ им. Н. Э. Баумана, МАДИ, МАМИ, 21 НИИ МО РФ, ФГУП ГНЦ «НАМИ», Академии БТВ, 21 и 38 НИИ МО РФ.

Для ВТС «ЗЭТ 6×6» разработан метод расчета оптимального показателя линейно-вязкого демпфирования в системе поддрессирования ВТС при его движении по совокупности дорожных условий во всем диапазоне возможных скоростей и определен коэффициент относительного затухания колебаний, который составил $\psi \approx 0,16$.

Исследован опыт отечественных и зарубежных разработчиков по применению ПКМ и других полимерных материалов в системах поддрессоривания транспортных средств. Проведен анализ способов динамического моделирования гистерезисного демпфирования конструкционных материалов.

В заключенную часть главы были вынесены основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели работы. Решению этих задач посвящены остальные главы диссертации.

Во второй главе представлены разработанные математические модели механического поведения рессоры из ПКМ и ее компонентов под нагрузкой. Объектом исследования является листовая стеклопластиковая рессора с полимерным межлистовым материалом. Модуль системы поддрессоривания ВТС представлен на рисунке 2, четверть-эллиптическая рессора ВТС – на рисунке 3.

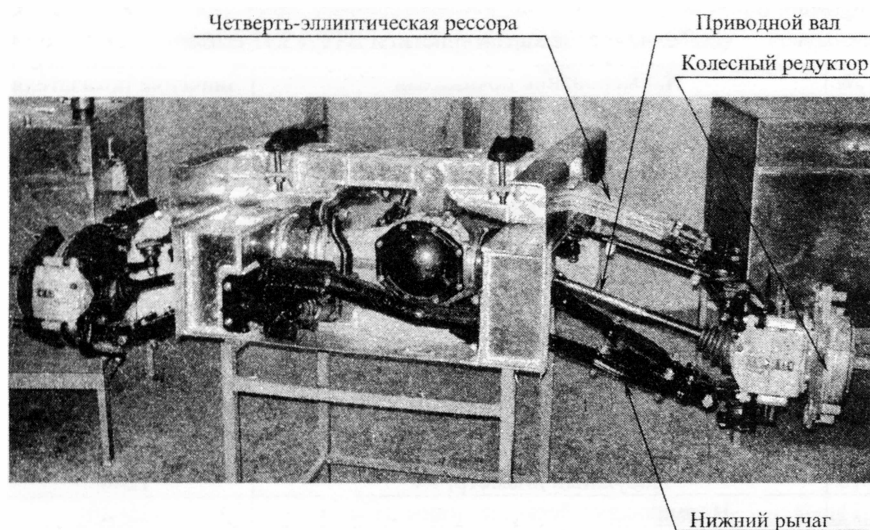


Рис. 2. Общий вид модуля системы поддрессоривания ВТС «ЗЭТ 6×6»

Для полимерных материалов, входящих в состав рессоры, используется уравнение состояния модели стандартного линейного тела в дробных производных:

$$\sigma(t) + \tau^\alpha D^\alpha [\sigma(t)] = E [\varepsilon(t) + \theta^\alpha D^\alpha [\varepsilon(t)]] \quad (0 < \alpha < 1), \quad (1)$$

впервые предложенное Капуто и Майнардн в 1971 г с использованием дробных производных Капуто как эмпирическая модель, позволяющая наиболее точно воспроизвести данные эксперимента.

Решение задач происходит с помощью принципа Вольтерра: решение линейной задачи вязкоупругости может быть получено из решения соответствующей задачи линейной теории упругости путем замены в нем констант упругости некоторыми операторами.

В данной работе используются механико-математические модели вязкоупругой среды, сводящиеся к закону Гука с помощью операторных представлений:

$$Q(s)[\sigma(t)] = ER(s)[\varepsilon(t)],$$

где $Q(s)$ и $R(s)$ — некоторые операторные полиномы, соответствующие выбранной вязкоупругой модели. Например, для модели стандартного линейного тела с дробными производными эти полиномы имеют вид:

$$Q(s) = \tau^\alpha s^\alpha + 1,$$

$$R(s) = \theta^\alpha s^\alpha + 1,$$

где α , τ , θ — вязкоупругие константы материала.

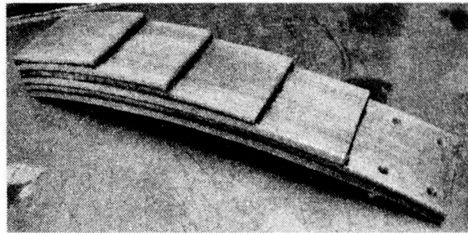


Рис. 3. Конструкция четверть-эллиптической рессоры

Тогда упругий оператор, соответствующий модулю Юнга первого рода при учете вязкоупругости будет иметь вид:

$$E(s) = \frac{ER(s)}{Q(s)}. \quad (2)$$

Основные допущения, принятые в моделях:

- 1) рассматривается поведение листов из ПКМ, относительная толщина которых мала по сравнению с двумя другими размерами. В этом случае, оказываются малыми напряжения, действующие по нормали к поверхности листа и касательные напряжения в плоскости, перпендикулярной этой нормали, на поверхности;
- 2) материалы одинаково ведут себя при растяжении и сжатии;
- 3) объемная деформация материалов не учитывается, жесткость листов поперек волокон высока;
- 4) для ПКМ справедлива гипотеза плоских сечений Эйлера-Бернулли;

- 5) не учитывается составляющая изгибающего момента, накапливающаяся по длине рессоры из-за наличия упругих продольных и поперечных межлистовых связей;
- 6) отсутствие продольных упругих межлистовых связей приводит к рассмотрению задачи совместного изгиба листов рессоры, основанного на их совместной работе при свободном относительном сдвиге;
- 7) скручивания оси рессоры не происходит.

В отношении допущения №5 было проведен дополнительный расчет, доказывающий правомерность такого допущения, который заключается в расчете изгиба спрямленной рессоры ВТС с учетом упругих поперечных связей в межлистовом материале по методике А.Р. Ржаницына.

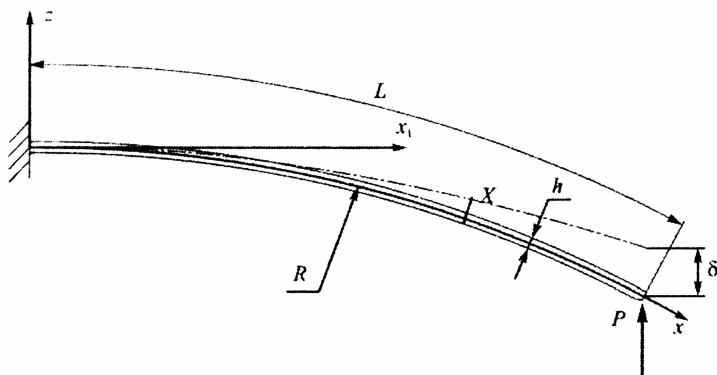


Рис. 4. Расчетная схема изгиба стеклопластикового листа

Установлено, что для одиночного стеклопластикового листа с расчетной схемой, приведенной на рисунке 4, зависимость прогиба δ от приложенной силы P , выраженная в параметрической форме примет вид:

$$P(t) = At + \theta^\alpha \cdot A \cdot D^\alpha[t] = A \left[t + \frac{\theta^\alpha \cdot \Gamma(2)}{\Gamma(2-\alpha)} t^{1-\alpha} \right] = A \left[t + \frac{\theta^\alpha}{\Gamma(2-\alpha)} t^{1-\alpha} \right], \quad (3)$$

$$\delta(t) = \frac{R^3}{EJ_y} \cdot (P_0(t) + \tau^\alpha D^\alpha[P_0(t)]) = \frac{AR^3}{EJ_y} \cdot \psi(L) \left[t + \frac{\tau^\alpha}{\Gamma(2-\alpha)} t^{1-\alpha} \right], \quad (4)$$

где A – скорость нарастания нагрузки, E – модуль Юнга стеклопластика, R – радиус начальной кривизны нейтрального слоя листа, J_y – момент инерции сечения, $\psi(L)$ – поправочный коэффициент, учитывающий начальную форму листа.

Аналогично для полимерного межлистового материала зависимость удлинения от растягивающей силы имеет вид:

$$P(t) = At + \theta^\alpha A \cdot D^\alpha [t] = A \left[t + \frac{\theta^\alpha \cdot \Gamma(2)}{\Gamma(2-\alpha)} t^{1-\alpha} \right] = A \left[t + \frac{\theta^\alpha}{\Gamma(2-\alpha)} t^{1-\alpha} \right], \quad (5)$$

$$\delta(t) = \frac{LA}{Edb} \left[t + \frac{\tau^\alpha}{\Gamma(2-\alpha)} t^{1-\alpha} \right], \quad (6)$$

где A – скорость нарастания нагрузки, E – модуль Юнга полимерного материала, l , d , b – начальные длина, толщина и ширина образца.

Задача изгиба рессоры в сборе решается по методу общей жесткости листов. При этом суммарный момент инерции сечения определяется суммой моментов инерции всех листов сечения. С учетом того, что листы выполнены из различных материалов будем искать суммарную жесткость сечения по соотношению:

$$EJ_\Sigma = E_K \sum \frac{b_{Ki} h_{Ki}^3}{12} + E_P \sum \frac{b_{Pi} h_{Pi}^3}{12} + E_C \sum \frac{b_{Ci} h_{Ci}^3}{12},$$

где E_K , b_{Ki} , h_{Ki} – модуль Юнга композиционного материала, ширина и толщина листов из ПКМ,
 E_P , b_{Pi} , h_{Pi} – модуль Юнга, ширина и толщина листов полимерного межлистового материала,
 E_C , b_{Ci} , h_{Ci} – модуль Юнга стальных листов, ширина и толщина стальных листов.

Расчетная схема приведена на рисунке 5.

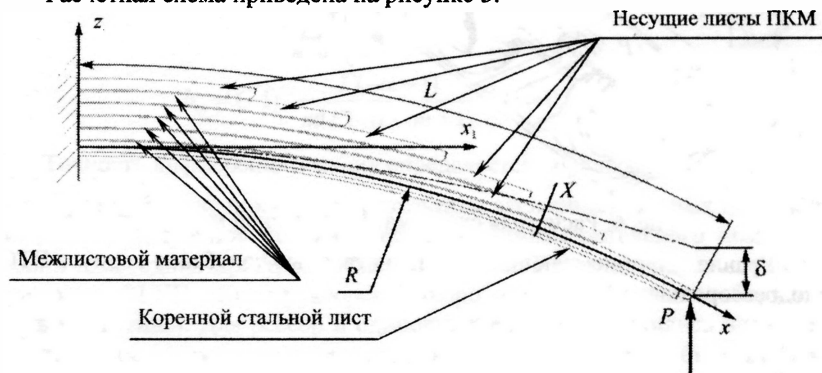


Рис. 5. Расчетная схема изгиба рессоры

Дробно-дифференциальное уравнение изгиба рессоры имеет вид:

$$\begin{aligned} A_{5i} D^{\alpha_1 + \alpha_2} [\delta(t)] + A_{6i} D^{\alpha_1} [\delta(t)] + A_{7i} D^{\alpha_2} [\delta(t)] + A_{8i} \delta(t) = \\ = A_{1i} D^{\alpha_1 + \alpha_2} [P(t)] + A_{2i} D^{\alpha_1} [P(t)] + A_{3i} D^{\alpha_2} [P(t)] + A_{4i} P(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где коэффициенты A_i описывают вязкоупругие свойства рессоры, определяются константами вязкоупругости материалов и ее геометрией.

Также во второй главе приводится оценка динамических свойств разработанной модели по АЧХ, приводятся методы определения показателей плавности хода ВТС, оснащенного упругодемпфирующими элементами систем поддрессирования в виде рессор из ПКМ. Приведена математическая модель прямолинейного движения ВТС по неровностям.

В качестве базовой математической модели при моделировании прямолинейного движения КМ по неровностям использована модель движения КМ при пространственной схеме возмущения со стороны дороги, разработанная на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Расчетная схема представлена на рисунке 6.

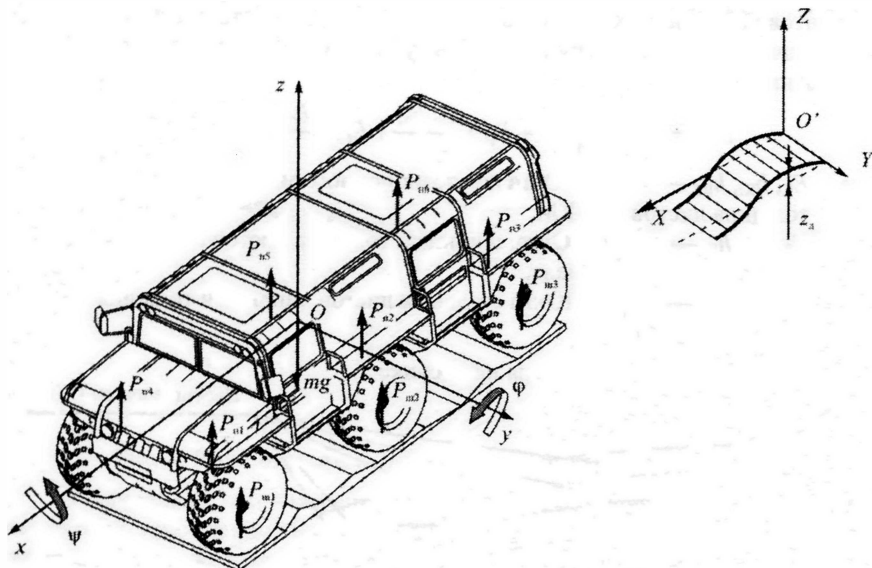


Рис. 6. Расчетная схема математической модели

Уравнения, описывающие пространственные колебания корпуса ВТС и неподдрессированных масс:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = \sum_{i=1}^6 P_{ni} - mg \\ J_y \ddot{\phi} = - \sum_{i=1}^6 P_{ni} l_i; \\ J_x \ddot{\psi} = \sum_{i=1}^6 P_{ni} b_i; \\ m_{\kappa i} \ddot{z}_{\kappa i} = -P_{ni} + P_{\psi i} - m_{\kappa i} g, \end{cases}$$

где m – масса корпуса ВТС; m_{ki} – масса колеса; z_{ki} – вертикальное положение i -го колеса относительно корпуса; J_x, J_y – моменты инерции ВТС относительно продольной и поперечной осей ВТС; l_i, b_i – расстояния от центра масс ВТС до центра i -го колеса вдоль осей x и y соответственно; $P_{ni}, P_{\pi i}$ – вертикальные силы в подвеске и контакте i -го колеса с дорогой.

Силы в подвеске P_{ni} определяются с помощью модели (7). Моделирование производится с учетом неудерживающей связи колеса с дорогой.

В связи с сущностью процессов численного интегрирования при математическом моделировании физических процессов в среде MATLAB Simulink предложен способ вычисления производных и интегралов дробного порядка на основании дискретных производных Грюнвальда-Летникова с помощью дискретных фильтров с передаточными функциями:

– для операции дробного дифференцирования:

$$H(Z^{-1}) = \frac{\sum_{m=0}^k b_m \cdot Z^{-m}}{T^\alpha}$$

$$b_m = (-1)^m \frac{\Gamma(\alpha + 1)}{m! \Gamma(\alpha - m + 1)} \quad (m = 0, 1, \dots, k);$$

– для операции дробного интегрирования:

$$H(Z^{-1}) = \frac{T^{-\alpha}}{\sum_{m=0}^k b_m \cdot Z^{-m}}$$

$$b_m = (-1)^m \frac{\Gamma(-\alpha + 1)}{m! \Gamma(-\alpha - m + 1)} \quad (m = 0, 1, \dots, k).$$

Точность дифференцирования определяется порядком фильтра k .

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований. Дается подробное описание аппаратурно-измерительного комплекса, условий и методики проведения экспериментов. Испытания проводились на территории ФГУП «Конструкторское бюро автотранспортного оборудования» в г. Мытищи. Для рессор и одиночных листов проводились испытания на статическое нагружение и циклическое воздействие. Также были произведены испытания межлистового материала на разрыв при растяжении. Схема испытаний одиночного листа и рессоры приведена на рисунке 7.

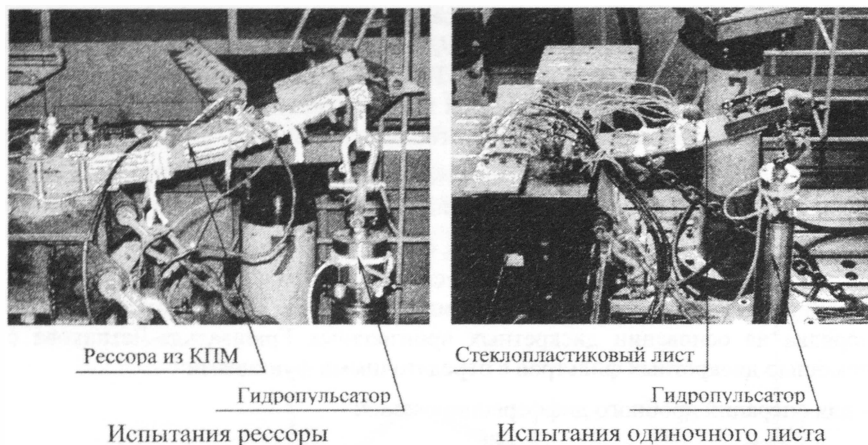


Рис. 7. Схема испытаний

Также произведено определение данных, необходимых для моделирования: определены экспериментально положение центра масс и нормальная жесткость шин, моменты инерции кузова определены при трехмерном моделировании.

Произведен регрессионный анализ экспериментальных данных, полученных при испытаниях с целью получения констант вязкоупругости материалов рессоры. Для этого использовались полученные регрессионные модели (3), (4), (5), (6).

На основании сравнения результатов натурного и численного эксперимента произведена оценка точности и адекватности математических моделей. Относительная погрешность моделирования прогиба стеклопластикового листа и гистерезисных потерь, оцениваемых по работе упруго-диссипативных сил за цикл, составила менее 5 %.

Для рессоры в сборе производилось сравнение результатов натурного и численного эксперимента, при моделировании которого использовались константы вязкоупругости, полученные в результате регрессионного анализа. Относительная погрешность моделирования прогиба рессоры составила 5,6 %, гистерезисных потерь – менее 5 %. Сравнение экспериментальных данных прогиба рессоры и ее модели представлено на рисунке 8, экспериментальная и смоделированная петли гистерезиса – на рисунке 9.

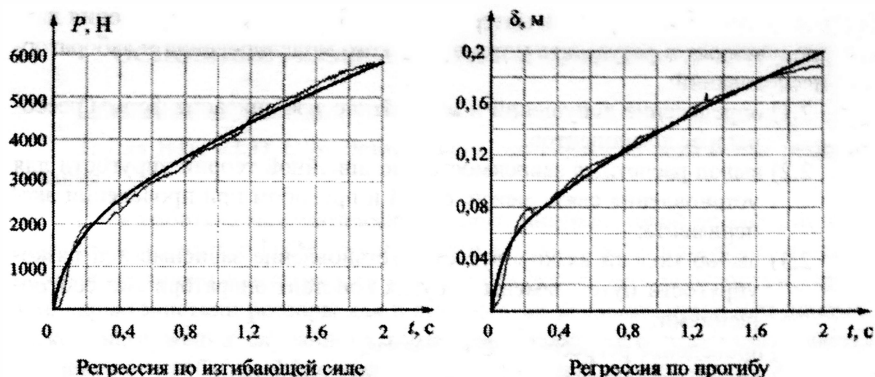


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных прогиба рессоры и ее модели

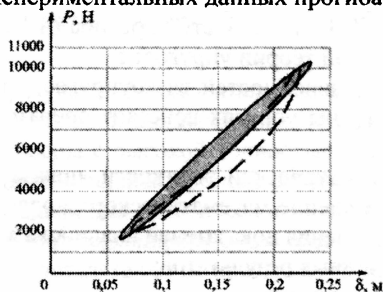


Рис. 9. Петли гистерезиса

На экспериментальной петле гистерезиса есть перегиб, связанный с несовершенством экспериментальной оснастки и оборудования. В энергетическом смысле модели схожи – энергии рассеяния совпадают, погрешность моделирования амплитуд прогибов и усилий мала.

В четвертой главе разработан алгоритм метода прогнозирования вязкоупругих свойств и способа моделирования механического поведения листовых рессор из ПКМ в системах подрессоривания КМ. В представленном методе можно выделить следующие основные этапы:

1) анализ исходных данных:

- 1.1) получение исходных данных для проектирования системы подрессоривания;
- 1.2) анализ условий применения и эксплуатации КМ, определение оптимальных показателей демпфирования КМ;
- 1.3) определение габаритных размеров и формы рессоры;
- 1.4) выбор композиционного материала и метода изготовления листов рессоры, выбор полимерного межлистового материала;

2) определение характеристик материалов на образцах путем сравнения данных, полученных в результате математического моделирования и лабораторных исследований:

- 2.1) определение допущений и математическое описание формы рессоры и ее компонентов;
- 2.2) вывод расчетных зависимостей по линейной теории упругости для установления связи между силой и прогибом при проведении эксперимента;
- 2.3) выбор модели вязкоупругости, установление зависимостей вязкоупругости путем замены упругих констант операторными соотношениями;
- 2.4) проведение регрессионного анализа;
- 2.5) оценка упругодемпфирующих свойств компонент;

3) определение характеристик рессоры:

- 3.1) вывод расчетных зависимостей прогиба от изгибающей нагрузки в рамках линейной теории упругости;
- 3.2) установление зависимостей вязкоупругости композиции материалов путем замены упругих констант операторными соотношениями;
- 3.3) определение статической жесткости, показателей демпфирования рессоры, проведение математического моделирования движения с целью установления показателей плавности хода;
- 3.4) оценка полученных результатов;

4) эксплуатационные испытания:

- 4.1) создание опытного образца;
- 4.2) проведение эксплуатационных испытаний;
- 4.3) анализ результатов испытаний.

Отличительными особенностями приведенного метода прогнозирования упругодемпфирующих свойств и механического поведения листовых рессор из ПКМ на основе стеклопластика являются:

- 1) определение оптимальных показателей демпфирования для ВТС в заданных условиях эксплуатации,
- 2) возможность на стадии проектирования аналитически или численно определить статическую жесткость и показатели демпфирования,
- 3) возможность оценить показатели плавности хода на этапе проектирования, а также провести все необходимые расчеты на долговечность по характеристикам, полученным при имитационном моделировании.
- 4) учет гистерезисного демпфирования с помощью уточненной модели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Основные результаты:

1. Для ВТС «ЗЭТ 6×6» установлены оптимальные показатели демпфирования.

2. Разработана математическая модель многolistовой рессоры из композиции материалов: ПКМ, полимерного межлистового материала и стали, которая позволяет аналитически и численно определить упругодемпфирующие характеристики рессоры как в статических режимах, так и при динамическом нагружении случайного характера. Особенностью модели является применение дробно-дифференциальных уравнений, позволяющих наиболее точно отразить поведение реальных вязкоупругих материалов под нагрузкой, а также возможность решения задачи как во временной, так и в частотной области.

3. Сравнением результатов численного математического моделирования и натурных экспериментов доказана адекватность разработанной математической модели рессоры с высокой точностью, приемлемой для прогнозирования эксплуатационных характеристик системы подрессоривания ВТС, а также пригодность модели для практического использования при разработке новых конструкций упругодемпфирующих элементов. Относительная погрешность по основным показателям не превышает 5 %.

4. Разработаны методы, позволяющие спрогнозировать на стадии проектирования упругодемпфирующие свойства и смоделировать механическое поведение листовой рессоры из композиции полимерных и конструкционных материалов с учетом конструктивных особенностей и энергетических характеристик материалов. Особенностью методов является наличие оптимизационного цикла для получения требуемых показателей демпфирования.

Основные выводы:

Применение ПКМ в составе упругодемпфирующих элементов систем подрессоривания ВТС с учетом ограничений скорости позволит повысить эффективность решения транспортных задач и использования этих транспортных средств в условиях бездорожья за счет следующих преимуществ:

1) Компактность. Обзор существующих конструкций систем подрессоривания с ПКМ показал, что в подавляющем большинстве случаев упругий элемент выполняет также функции направляющего и демпфирующего устройств подвески. Компонировочно такие подвески обладают меньшей материалоемкостью, чем аналоги, выполненные из конструкционных материалов.

2) Массовые показатели. Рессоры из ПКМ обладают наименьшими из возможных показателями удельной массы, обеспечивая при этом требуемые показатели жесткости. Как следствие снижается снаряженная масса ВТС. Снижение массы направляющего устройства подвески снижает также и массу подрессоренной и непрорессоренной частей, что положительно сказывается на показателях плавности хода.

3) Характеристики демпфирования. ПКМ, а также полимерные резино-подобные материалы проявляют гистерезисные свойства. Показатели демпфирования не зависят от частоты, стабильны во всей частотной области возможных вынужденных колебаний подвески. Величина демпфирования мала по отношению к аналогичному показателю для гидравлического амортизатора, однако это допустимо из-за снижения требуемых показателей демпфирования для специальных ВТС, передвигающихся со скоростями до 50 км/ч. В ходе теоретических исследований установлено, что гистерезисных свойств ПКМ на основе стеклопластика с эпоксидным связующим недостаточно для достижения требуемых показателей демпфирования. Необходимо применение иных материалов с большими гистерезисными свойствами. Максимальное значение коэффициента относительного рассеяния энергии для ПКМ с полимерным связующим достигает $\psi = 0,1 \dots 0,15$. Полимерный межлистовой резиноподобный материал позволяет получить высокие показатели демпфирования. Наличие межлистового материала в составе рессоры незначительно (из-за малости его толщины) снижает ее жесткость, но при этом увеличивает показатели демпфирования. За счет применения полимерного межлистового материала достигается требуемая диссипация энергии в системе подрессорирования ВТС.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Староверов Н. Н., Полунгян А. А., Котиев Г. О. Применение интерполяционных методов при разработке военных колесных машин // Оборонная техника. 2010. № 1-2. С. 66-71.
2. Староверов Н. Н., Котиев Г. О., Смирнов А. А. Применение полимерных композиционных материалов в системах подрессорирования колесных машин // technomag.edu.ru. Наука и образование, 2011. №6. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/194057.html> (дата обращения: 27.06.2011).
3. Староверов Н. Н., Котиев Г. О., Даштиев И. З. Моделирование вязкоупругих свойств и механического поведения рессоры из полимерных композиционных материалов под нагрузкой // technomag.edu.ru. Наука и образование, 2011. №7. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/194830.html> (дата обращения: 27.06.2011).
4. Староверов Н. Н. Моделирование вязкоупругих свойств и гистерезисного демпфирования рессор из композиционных материалов // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2011. № 8. С. 24 – 33.