

## Применение полимерных композиционных материалов в системах поддрессоривания колесных машин

# 06, июнь 2011

авторы: Староверов Н.Н., Котиев Г.О., Смирнов А.А.

УДК: 629.373.3, 629.3.027.3

МГТУ им. Н.Э. Баумана

[staroverov\\_nn@mail.ru](mailto:staroverov_nn@mail.ru)

[kotievgo@yandex.ru](mailto:kotievgo@yandex.ru)

[smr\\_a@mail.ru](mailto:smr_a@mail.ru)

### Введение

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. 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.

Система поддрессоривания автомобиля и демпфирование в ней должны обеспечить требуемые показатели плавности и безопасности движения и устойчивости на поворотах. Свойства самой подвески зависят от различных параметров и взаимодействия отдельных деталей, т. е. от типа и жесткости упругих элементов, стабилизаторов, шарниров рычагов, амортизаторов и их соединения, массы неподрессоренных частей транспортного средства и особенно от шин.

### Часть I. Анализ динамики систем поддрессоривания колесных машин и методы ее улучшения

Известен количественный показатель рациональной меры демпфирования в системе поддрессоривания, установленный для широкого класса транспортных средств в различных

дорожных условиях. На основе статистической обработки данных о показателях демпфирования систем поддресоривания коэффициент относительного рассеяния энергии в подвеске дорожных машин следует задавать из диапазона 0,2...0,3 [1, 5, 6, 8, 10, 11].

Проанализируем особенности подвески на шинах сверхнизкого давления. Для этого рассмотрим двухмассовую механическую систему, эквивалентную подвеске одного колеса КМ, изображенную на рисунке 1 [2, 5, 6, 8].

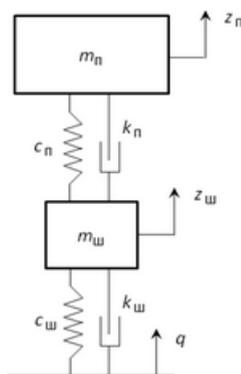


Рис. 1. Модель системы поддресоривания

Колебания масс системы описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{\text{ш}}\ddot{z}_{\text{ш}} + k_{\text{ш}}\dot{z}_{\text{ш}} + c_{\text{ш}}z_{\text{ш}} + k_{\text{п}}(\dot{z}_{\text{ш}} - \dot{z}_{\text{п}}) + c_{\text{п}}(z_{\text{ш}} - z_{\text{п}}) = k_{\text{ш}}\dot{q} + c_{\text{ш}}q, \\ m_{\text{п}}\ddot{z}_{\text{п}} + k_{\text{п}}(\dot{z}_{\text{п}} - \dot{z}_{\text{ш}}) + c_{\text{п}}(z_{\text{п}} - z_{\text{ш}}) = 0, \end{cases}$$

где  $m_{\text{п}}$ ,  $m_{\text{ш}}$  — массы поддресоренных и неподдресоренных частей, кг,  
 $z_{\text{п}}$ ,  $z_{\text{ш}}$  — перемещения поддресоренной и неподдресоренной масс, м,  
 $k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{ш}}$  — коэффициенты линейно-вязкого трения в подвеске и шине соответственно, Н·с/м,  
 $c_{\text{п}}$ ,  $c_{\text{ш}}$  — коэффициенты жесткости подвески и шины соответственно, Н/м,  
 $q$  — заданное кинематическое возмущение, м.

Передаточные функции такой системы по перемещениям поддресоренной и неподдресоренной масс относительно возмущения описываются соотношениями:

$$W_{z_{\text{ш}}q}(s) = \frac{z_{\text{ш}}(s)}{q(s)} = \frac{(k_{\text{ш}}s + c_{\text{п}})(m_{\text{п}}s^2 + k_{\text{п}}s + c_{\text{п}})}{\Delta},$$

$$W_{z_{\text{п}}q}(s) = \frac{z_{\text{п}}(s)}{q(s)} = \frac{(k_{\text{ш}}s + c_{\text{п}})(k_{\text{п}}s + c_{\text{п}})}{\Delta},$$

где  $z_{\text{ш}}(s)$ ,  $z_{\text{п}}(s)$ ,  $q(s)$  — преобразования Лапласа переменных  $z_{\text{ш}}(t)$ ,  $z_{\text{п}}(t)$ ,  $q(t)$  соответственно,

$$\Delta = m_{\text{п}}m_{\text{ш}}s^4 + [(k_{\text{п}} + k_{\text{ш}})m_{\text{п}} + k_{\text{п}}m_{\text{ш}}]s^3 + [(c_{\text{п}} + c_{\text{ш}})m_{\text{п}} + c_{\text{п}}m_{\text{ш}} + k_{\text{п}}k_{\text{ш}}]s^2 + (c_{\text{п}}k_{\text{ш}} + c_{\text{ш}}k_{\text{п}}) + c_{\text{п}}c_{\text{ш}}.$$

Тогда передаточная функция по ускорениям подрессоренной массы относительно возмущения имеет вид:

$$W_{\ddot{z}_{\text{п}}q}(s) = s^2 W_{z_{\text{п}}q}(s) = s^2 \cdot \frac{(k_{\text{ш}}s + c_{\text{п}})(k_{\text{п}}s + c_{\text{п}})}{\Delta}.$$

Передаточная функция по прогибу и скорости прогиба подвески имеют вид:

$$W_{\Delta zq}(s) = W_{z_{\text{ш}}q}(s) - W_{z_{\text{п}}q}(s) = \frac{m_{\text{п}}s^2(k_{\text{ш}}s + c_{\text{п}})}{\Delta},$$

$$W_{\Delta \dot{z}q}(s) = s(W_{z_{\text{ш}}q}(s) - W_{z_{\text{п}}q}(s)) = \frac{m_{\text{п}}s^3(k_{\text{ш}}s + c_{\text{п}})}{\Delta}.$$

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы по виброускорениям подрессоренной массы, прогибу и скорости прогиба подвески описываются соотношениями:

$$H_{\ddot{z}_{\text{п}}q}(\omega) = |W_{\ddot{z}_{\text{п}}q}(j\omega)|,$$

$$H_{\Delta zq}(\omega) = |W_{\Delta zq}(j\omega)|,$$

$$H_{\Delta \dot{z}q}(\omega) = |W_{\Delta \dot{z}q}(j\omega)|,$$

где  $j = \sqrt{-1}$ .

Среднеквадратические отклонения ускорения подрессоренной массы определяются соотношением:

$$\sigma_{\ddot{z}_{\text{п}}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |H_{\ddot{z}_{\text{п}}q}(\omega)|^2 G_q(\omega) d\omega}, \quad (1)$$

где  $G_q(\omega)$  — спектральная плотность возмущения.

Задавшись предварительно жесткостью подвески, изменяем жесткость шины и коэффициент линейно-вязкого демпфирования в подвеске. Варьируя нагрузочные режимы

от дорожной поверхности, получим по формуле (1) поверхности, изображенные на рисунках 2, 3, 4.

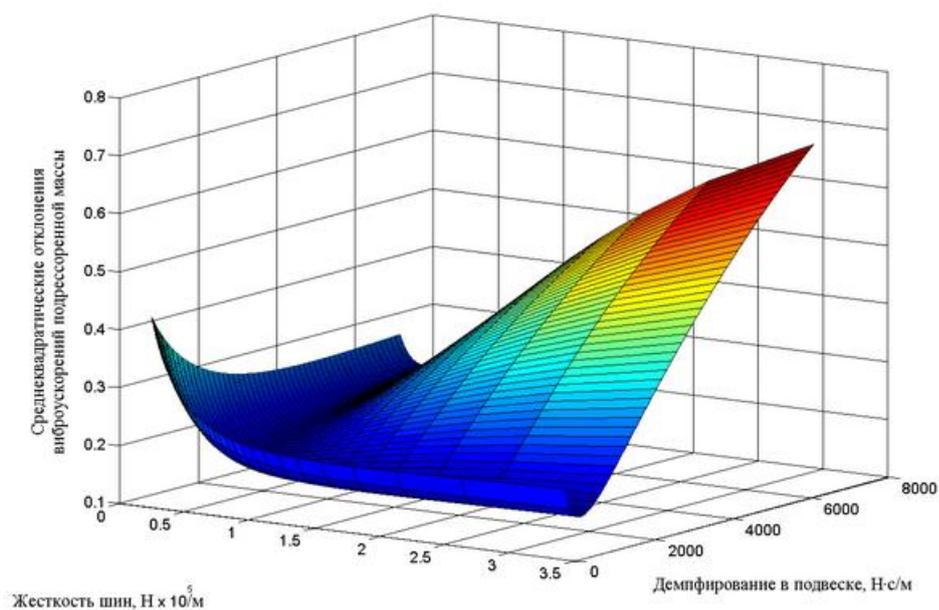


Рис. 2. Поверхность среднеквадратических отклонений виброускорений поддрессоренной массы при движении по асфальтобетонному покрытию на шинах различной жесткости

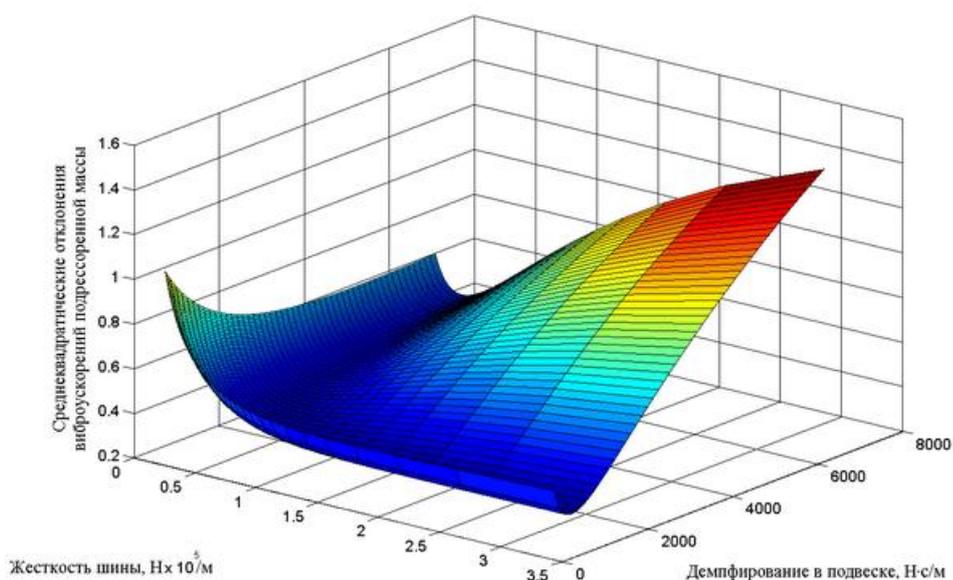


Рис. 3. Поверхность среднеквадратических отклонений виброускорений поддрессоренной массы при движении по грунтовой дорожной поверхности на шинах различной жесткости

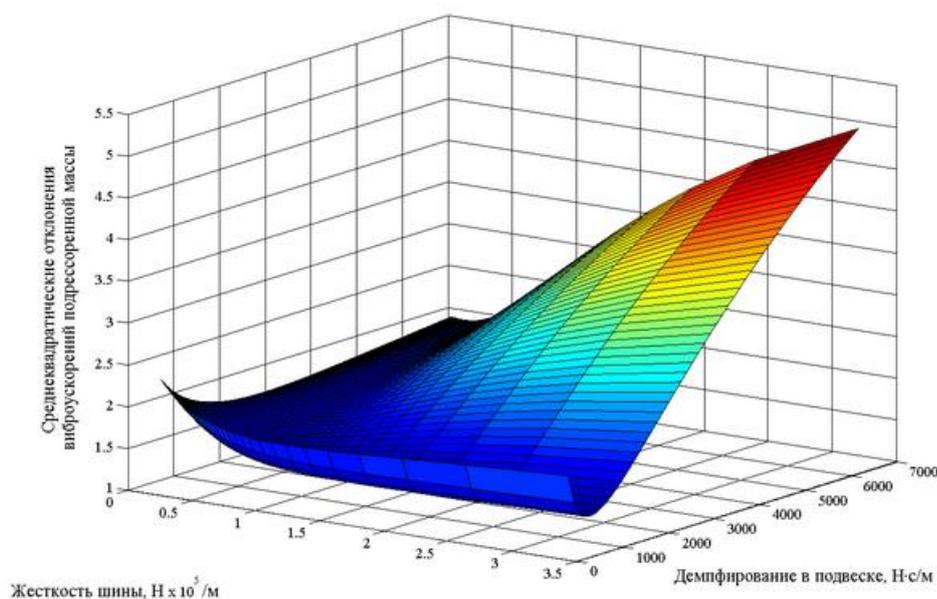


Рис. 4. Поверхность среднеквадратических отклонений виброускорений поддрессоренной массы при движении по грунтовой дороге на шинах различной жесткости

Анализ графиков показывает, что за счет использования мягких шин можно добиться снижения ускорений поддрессоренной массы. Однако, слишком мягкие шины ухудшают показатели плавности хода. Чем более нагружен режим, тем менее выражено это влияние. Кроме того, введение в конструкцию большого показателя демпфирования может существенно ухудшить плавность хода КМ. Таким образом, возникают предпосылки отказаться от гидравлического амортизатора в пользу снижения массы конструкции и использовать гистерезисное демпфирование в подвеске. Для оценки правомерности такого перехода требуется оценить для каждого конкретного транспортного средства оптимальную меру демпфирования.

## Часть II. Определение оптимальной меры демпфирования ВТС

Объектом исследования в данной статье является ВТС «ЗЭТ 6х6» (рисунок 5), разработанное в конструкторском бюро кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2007 году по заказу компании ОАО «АВТОРОС» ([www.z-project.ru](http://www.z-project.ru)). Технические характеристики ВТС приведены в таблице 1.



Рис. 5. Вездеходное транспортное средство 6х6 со стеклопластиковой четверть-эллиптической рессорой

Таблица 1 — Технические характеристики ВТС «ЗЭТ 6х6»

№	Наименование показателя	Значение показателя
1	Полная масса, кг	3500
2	Неподрессоренная масса одного колеса, кг	75
Моменты инерции ВТС		
3	относительно продольной оси КМ $x$ , кг·м <sup>2</sup>	1010
4	относительно поперечной оси КМ $y$ , кг·м <sup>2</sup>	10012
5	относительно вертикальной оси $z$ , кг·м <sup>2</sup>	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
<b>Шины «AVTOROS X-TRIM»</b>		
10	Наружный диаметр, мм	1240
11	Нормальная жёсткость шины, Н/м	125020

Цель расчета – определение оптимального приведенного к линейному коэффициенту демпфирования в подвеске ВТС для обеспечения наилучших показателей плавности хода в эксплуатационных скоростях во всем диапазоне дорожных условий целевого региона эксплуатации.

Согласно ОСТ 37.001.275–84 «Автотранспортные средства. Методы испытаний на плавность хода» [12] параметры плавности хода автотранспортных средств (АТС) оцениваются при проезде по трем типам дорог, статистические характеристики которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Номенклатура и характеристики участков дорог автополигона НИЦИАМТ для испытаний на плавность движения АТС

Номер участка дороги	Вид дороги	Длина участка, м	Диапазон длин волн, м	Средние квадратические значения высоты неровностей, м
I	Цементобетонная динамометрическая дорога	1000	0,40–40	$0,6 \cdot 10^{-2}$
II	Булыжная мощёная дорога без выбоин	1000	0,25–25	$1,1 \cdot 10^{-2}$
III	Булыжник с выбоинами	500	0,12–12	$2,9 \cdot 10^{-2}$

Номера участков и скорости движения, при которых проводятся испытания на плавность хода полноприводных грузовых АТС приведены в таблице 3 в соответствии с ОСТ 37.001.291-84 «Автотранспортные средства. Технические нормы плавности хода» [13].

Таблица 3 — Скорости движения АТС при испытаниях на плавность движения

Номер участка дороги	Скорость движения АТС, км/ч
I	30, 50, 70
II	30, 45, 60
III	10–15

Согласно [3, 6, 9] статистические характеристики микропрофиля дорожной поверхности задаются дисперсией высот микропрофиля и общим аппроксимирующим выражением нормированной корреляционной функции вида:

$$\rho_q(l) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i |l|} \cos \beta_i l, \quad (2)$$

где  $A_i$ ,  $\alpha_i$  – коэффициенты, характеризующие степень нерегулярности микропрофиля,

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1 ;$$

$\beta_i$  – коэффициент, характеризующий узкополосность случайной функции микропрофиля поверхности дороги. Параметры, входящие в общее аппроксимирующее выражение нормированной корреляционной функции, для каждого типа дорог приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Значения коэффициентов аппроксимации корреляционной функции микро-профиля поверхности дорог

№ участка дороги	Дисперсия высот микропрофиля $D_q \cdot 10^4, \text{ м}^2$	$A_1$	$A_2$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
				$\text{м}^{-1}$			
I	0,36	1,000	0	0,15	0	0	0
II	1,21	1,000	0	0,45	0	0	0
III	8,41	0,850	0,150	0,15	0	0,20	2,00

Определение параметров качества системы подрессоривания происходит при решении динамической задачи расчета вертикальных и продольно-угловых колебаний ВТС в частотной области. Расчетная схема задачи представлена на рисунке 6. Параметры динамической системы, показанные на рисунке 6, с расшифровкой обозначений и принятыми значениями приведены в таблице 5.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение системы, имеет вид:

$$\begin{cases} m_{\text{пм}} \ddot{z}_0 + \sum_{i=1}^3 (k_{\text{п}} \dot{h}_{z_{\text{п}i}} + c_{\text{п}} h_{z_{\text{п}i}}) = 0, \\ J_y \ddot{\varphi}_0 + \sum_{i=1}^3 (k_{\text{п}} \dot{h}_{z_{\text{п}i}} + c_{\text{п}} h_{z_{\text{п}i}}) l_i = 0, \\ m_i \ddot{z}_i - (k_{\text{п}} \dot{h}_{z_{\text{п}i}} + c_{\text{п}} h_{z_{\text{п}i}}) + k_{\text{ш}} (\dot{z}_i - \dot{q}_i) + c_{\text{ш}} (z_i - q_i) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

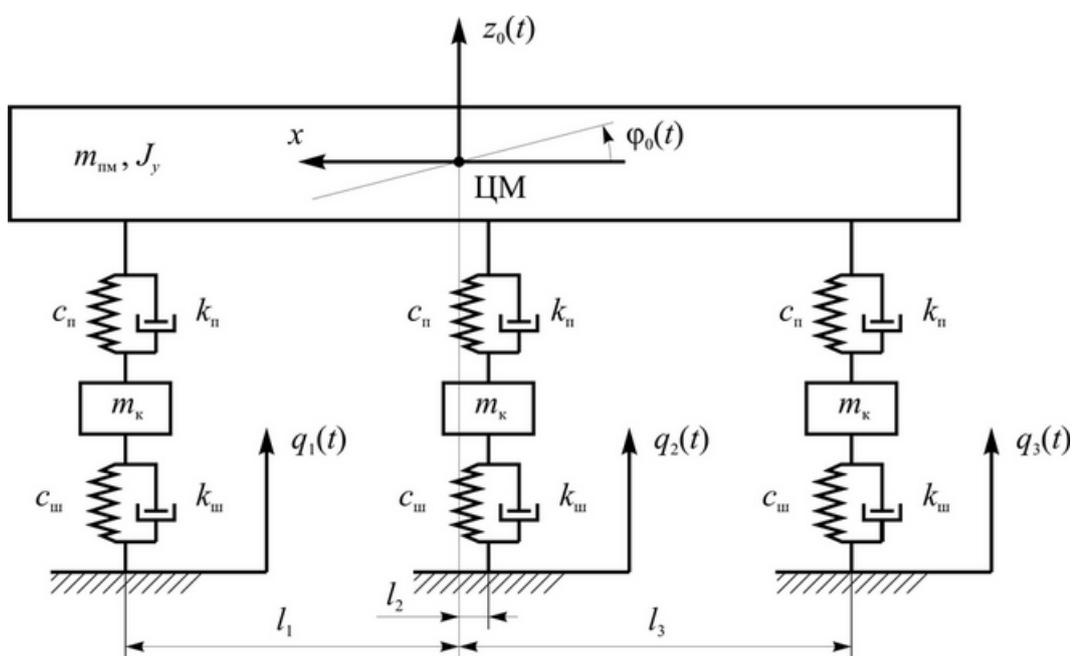


Рис. 6. Расчетная схема динамической задачи плоского движения ВТС по неровностям

Таблица 5 — Параметры динамической системы

Обозначение параметра	Наименование параметра	Значение
$m_{\text{пм}}$	Масса подрессоренной части ВТС, кг	3050
$J_y$	Момент инерции относительно поперечной оси, проходящей через центр масс, кг·м <sup>2</sup>	10011,67
$m$	Масса неподдресоренной части оси, кг	150
$c_{\text{п}}$	Приведенный к колесу коэффициент жесткости подвески оси (для двух рессор), Н/м	74366,8
$c_{\text{ш}}$	Приведенный к колесу коэффициент жесткости шин оси (для двух колес), Н/м	250039,3
$k_{\text{ш}}$	Приведенный к колесу коэффициент демпфирования шин оси (для двух колес), Н·с/м	1580
$l_1$	Расстояние от центра масс до передней оси, м	2,328
$l_2$	Расстояние от центра масс до средней оси, м	-0,047
$l_3$	Расстояние от центра масс до задней оси, м	-2,422

Применив к уравнениям системы (3) преобразование Лапласа и учитывая выражение для прогиба подвески:

$$h_{z_{ni}} = z_0 + l_i \Phi_0 - z_i,$$

получим систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \left( m_{\text{пм}} s^2 + \sum_{i=1}^3 k_{\text{п}} s + \sum_{i=1}^3 c_{\text{п}} \right) z_0 + \left( \sum_{i=1}^3 k_{\text{п}} l_i s + \sum_{i=1}^3 c_{\text{п}} l_i \right) \Phi_0 - \left( \sum_{i=1}^3 k_{\text{п}} s z_i + \sum_{i=1}^3 c_{\text{п}} z_i \right) = 0, \\ \left( J_y s^2 + \sum_{i=1}^3 k_{\text{п}} s + \sum_{i=1}^3 c_{\text{п}} \right) \Phi_0 + \left( \sum_{i=1}^3 k_{\text{п}} l_i s + \sum_{i=1}^3 c_{\text{п}} l_i \right) z_0 - \left( \sum_{i=1}^3 k_{\text{п}} l_i s z_i + \sum_{i=1}^3 c_{\text{п}} l_i z_i \right) = 0, \\ \left( m s^2 + (k_{\text{п}} + k_{\text{ш}}) s + (c_{\text{п}} + c_{\text{ш}}) \right) z_i - (k_{\text{п}} s + c_{\text{п}}) z_0 - (k_{\text{п}} s + c_{\text{п}}) l_i \Phi_0 = (k_{\text{ш}} s + c_{\text{ш}}) q_i. \end{cases}$$

Учет запаздывания возмущения на средней и задней осях вводится аналогично [5, 6].

Для определения передаточных функций используется матричный метод решения систем линейных уравнений. Матрица системы  $M$  имеет вид:

$$\begin{bmatrix} m_{\text{mm}}s^2 + 3k_{\text{n}}s + 3c_{\text{n}} & \sum_{i=1}^3 (k_{\text{n}}s + c_{\text{n}})l_i & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}}) & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}}) & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}}) \\ \sum_{i=1}^3 (k_{\text{n}}s + c_{\text{n}})l_i & J_y s^2 + 3k_{\text{n}}s + 3c_{\text{n}} & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}})l_1 & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}})l_2 & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}})l_3 \\ -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}}) & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}})l_1 & K & 0 & 0 \\ -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}}) & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}})l_2 & 0 & K & 0 \\ -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}}) & -(k_{\text{n}}s + c_{\text{n}})l_3 & 0 & 0 & K \end{bmatrix}$$

где  $K = ms^2 + (k_{\text{n}} + k_{\text{ш}})s + (c_{\text{n}} + c_{\text{ш}})$ .

При этом вектор переменных, соответствующих столбцам матрицы  $M$  имеет вид

$$(z_0, \varphi_0, z_1, z_2, z_3).$$

Столбец свободных членов:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \\ Le^{-\tau_1 s} \\ Le^{-\tau_2 s} \end{bmatrix},$$

где  $L = k_{\text{ш}}s + c_{\text{ш}}$ ,

$\tau_1 = \frac{l_1 - l_2}{V}$ ,  $\tau_2 = \frac{l_1 - l_3}{V}$  — времена запаздывания возмущений для средней и задней осей,  
 $V$  — скорость движения ВТС.

В результате решения системы линейных уравнений станут известны передаточные функции:

- передаточная функция вертикальных перемещений подрессоренной массы относительно возмущения,

$$W_{z_0 q}(s) = \frac{z_0(s)}{q(s)},$$

- передаточная функция продольно-угловых перемещений подрессоренной массы относительно возмущения,

$$W_{\varphi_0 q}(s) = \frac{\varphi_0(s)}{q(s)},$$

- передаточная функция вертикальных перемещений  $i$ -го колеса относительно возмущения,

$$W_{z_i q}(s) = \frac{z_i(s)}{q(s)},$$

Передаточная функция прогиба подвески  $i$ -й оси определится соотношением:

$$W_{z_{пi} q}(s) = W_{z_0 q} + l_i W_{\varphi_0 q} - W_{z_i q}.$$

Передаточная функция прогиба шин  $i$ -й оси определится соотношением:

$$W_{z_{шi} q}(s) = 1 - W_{z_i q}.$$

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные из передаточных функций обозначим:

$H_{z_0 q}(\omega)$  — АЧХ вертикальных виброускорений поддрессоренной массы относительно возмущения,

$H_{\ddot{\varphi}_0 q}(\omega)$  — АЧХ продольно-угловых ускорений поддрессоренной массы относительно возмущения,

$H_{z_{пi} q}(\omega)$  — АЧХ прогиба подвески  $i$ -й оси относительно возмущения,

$H_{z_{шi} q}(\omega)$  — АЧХ прогиба шин  $i$ -й оси относительно возмущения.

Согласно [1,2] спектральная плотность возмущения задается выражением:

$$G_q(\omega) = 4D_q g_q(\omega),$$

$$\text{где } g_q(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \alpha_i V^2 ((\alpha_i V)^2 + (\beta_i V)^2 + \omega^2)}{\omega^4 + 2((\alpha_i V)^2 - (\beta_i V)^2) \omega^2 + ((\alpha_i V)^2 + (\beta_i V)^2)^2} —$$

нормированная спектральная плотность возмущения, полученная из аппроксимирующего выражения нормированной корреляционной функции вида (2) после интегрирования и замены  $\theta = \omega / V$ .

Случайные процессы, характеризующие выход упругого устройства на режим ограничителя хода и отрыва колеса от дороги, имеют нормальный закон распределения, поэтому

вероятности возникновения указанных режимов можно оценить с использованием функции распределения вероятностей:

$$\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt .$$

Величины, характеризующие качество системы поддресоривания, определяются соотношениями:

- дисперсии вертикальных ускорений поддресоренной массы:

$$D_{z_0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_g} G_q(\omega) |H_{z_0q}(\omega)|^2 d\omega ,$$

- дисперсии продольно-угловых ускорений поддресоренной массы:

$$D_{\ddot{\varphi}_0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_g} G_q(\omega) |H_{\ddot{\varphi}_0q}(\omega)|^2 d\omega ,$$

- вероятность пробоа подвески  $i$ -й оси:

$$P_{z_{\Pi i}} = P\{z_{\Pi i} > h_{z_{\Pi}}\} = 0,5 \left[ 1 - \Phi \left( \frac{h_{z_{\Pi}}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{z_{\Pi i}}} \right) \right] ,$$

$$\sigma_{z_{\Pi i}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_g} G_q(\omega) |H_{z_{\Pi},q}(\omega)|^2 d\omega} ,$$

- вероятность отрыва колес  $i$ -й оси от дорожной поверхности:

$$P_{z_{\text{III}i}} = P\{z_{\text{III}i} > h_{z_{\text{III}}}\} = 0,5 \left[ 1 - \Phi \left( \frac{h_{z_{\text{III}}}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{z_{\text{III}i}}} \right) \right] ,$$

$$\sigma_{z_{\text{III}i}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_g} G_q(\omega) |H_{z_{\text{III}},q}(\omega)|^2 d\omega} .$$

Целевую функцию оптимизационной задачи определения необходимой меры демпфирования зададим в следующем виде:

$$F(k_{\Pi}) = \sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot \left[ \sum_{j=1}^{n_j} a_{i,j} \cdot \left( D_{z_{i,j}} + D_{\ddot{\varphi}_{i,j}} + \sum_{k=1}^3 (b_{i,j,k} P_{z_{\Pi i,j,k}} + c_{i,j,k} P_{z_{\text{III}i,j,k}}) \right) \right] . \quad (4)$$

где

$D_{z_{i,j}}$  — дисперсии вертикальных ускорений подрессоренной массы при движении в  $i$ -х дорожных условиях с  $j$ -й скоростью;

$D_{\varphi_{i,j}}$  — дисперсии продольно-угловых ускорений подрессоренной массы при движении в  $i$ -х дорожных условиях с  $j$ -й скоростью;

$P_{zn_{i,j,k}}$  — вероятность пробоя подвески  $k$ -ой оси ВТС при движении в  $i$ -х дорожных условиях с  $j$ -й скоростью,  $0 \leq P_{zn_{i,j,k}} \leq 1$ ,

$P_{ш_{i,j,k}}$  — вероятность отрыва колес  $k$ -ой оси ВТС при движении в  $i$ -х дорожных условиях с  $j$ -й скоростью,  $0 \leq P_{ш_{i,j,k}} \leq 1$ ,

$a_{i,j}$ ,  $b_{i,j,k}$ ,  $c_{i,j,k}$ ,  $\gamma_i$  — весовые коэффициенты.

В задаче ищется минимум целевой функции.

Значения весовых коэффициентов  $b_{i,j,k}$ ,  $c_{i,j,k}$  при значениях соответствующих им вероятностей, не выходящим за допустимые уровни, равны 0. В остальных случаях, они задаются равными единице. Допустимые уровни вероятностей выбросов ускорений за допустимые пределы, отрыва колес от дороги и пробоя подвески зададим равными 5%, т.е.

$$P_{z_{i,доп}} = 0,05, P_{zn_{i,j,доп}} = 0,05, P_{ш_{i,j,доп}} = 0,05.$$

Коэффициент  $\gamma_i$  определим равным вероятности движения машины в  $i$ -х дорожных условиях, т.е. равным ее относительному пробегу в этих условиях. Относительные пробеги автомобиля устанавливаются в соответствии с ОСТ 37.001.472–88 «Приемочные испытания. Типовая программа» [14]. Принятое распределение приведено в таблице 6.

Таблица 6 — Распределение пробегов ВТС «ЗЭТ 6х6» по ОСТ 37.001.472-88

№	Виды дорог	Распределение пробега, %
Дороги с усовершенствованными покрытиями		
1	А) дороги общего пользования и (или) скоростная дорога автополигона	10
2	Б) городские дороги и (или) имитация городского движения на дорогах автополигона	0

3	В) горные дороги или горный маршрут автополигона	5
Дороги с переходными покрытиями		
4	Бульжные дороги общего пользования в удовлетворительном состоянии и (или) бульжная дорога автополигона с бульжным мощением	25
Дороги с низшими покрытиями, без покрытий и местность:		
5	А) грунтовые дороги общего пользования в удовлетворительном состоянии и (или) грунторавнинная дорога автополигона (в т.ч. заснеженные укатанные дороги)	30
6	Б) грунтовые разбитые дороги (с колеями и выбоинами) в сухом или замерзшем состоянии	15
7	В) грунтовые дороги размокшие, заснеженные неукатанные, снежная целина, супычий песок, допускающие движение автомобиля без застревания	15

Движение по бульжнику с выбоинами, соответствующему типу III дорог согласно таблице 2 примем эквивалентным движению по дорогам с низшими покрытиями, без покрытий и местности по таблице 6. Тогда распределение относительных пробегов по типам дорог таблицы 2 приведено в таблице 7.

Таблица 7 — Относительные пробеги ВТС «ЗЭТ 6х6»

Номер участка дороги автополигона НИЦИАМТ	Установленный относительный пробег для ВТС «ЗЭТ 6х6», %
I	15
II	25
III	60

Весовой коэффициент  $a_{ij}$  принят для учета фактической возможности движения ВТС в  $i$ -х дорожных условиях с  $j$ -й скоростью. Определим его как относительный пробег в  $i$ -х дорожных условиях с  $j$ -й скоростью.

Экспериментально установлено, что изменение скорости движения КМ для дорожных условий нашей страны приближенно можно описать нормальным законом распределения [4]. Считая среднюю скорость движения в  $i$ -х дорожных условиях равной:

$$\bar{V}_i = 0,6V_{\max i} ,$$

а среднее квадратическое отклонение скорости:

$$\sigma_{V_i} = \frac{\bar{V}_i}{3} ,$$

для всех скоростей, кроме максимальной экспериментальной, определяем квантили нормального распределения:

$$y_{i,j} = \frac{V_{i,j} - \bar{V}_i}{\sigma_{V_i}} ,$$

характеризующие разности  $V_{i,j} - \bar{V}_i$  в долях среднего квадратического отклонения  $\sigma_{V_i}$ .

По формуле

$$\Phi(y_{i,j}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_{i,j}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

для каждого  $y_{ij}$  находим площадь под той частью кривой нормального распределения, которая расположена левее координаты  $V_{ij}$ .

Считаем, что разность  $a_{i,j}$  двух смежных значений  $\Phi(y_{ij})$  и  $\Phi(y_{i,j-1})$  равна относительному пробегу на скорости близкой к  $j$ -й в  $i$ -х дорожных условиях. Для  $j = 1$  принимаем  $\Phi(y_{i,j-1}) = 0$ . Относительный пробег на максимальной экспериментальной скорости равен:

$$a_{i,j_{\max}} = 1 - \sum_{j=1}^{j_{\max}-1} a_{i,j} .$$

Значения коэффициента  $a_{i,j}$  приведены в таблице 8.

Остальные весовые коэффициенты определяются следующими зависимостями:

$$b_{i,j,k} = \begin{cases} 0 & \text{при } P_{zn_{i,j,k}} \leq 0,05, \\ 1 & \text{при } P_{zn_{i,j,k}} > 0,05; \end{cases}$$

$$c_{i,j,k} = \begin{cases} 0 & \text{при } P_{ш_{i,j,k}} \leq 0,05, \\ 1 & \text{при } P_{ш_{i,j,k}} > 0,05; \end{cases}$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 0,15 & \text{при } i = 1, \\ 0,25 & \text{при } i = 2, \\ 0,6 & \text{при } i = 3. \end{cases}$$

Таблица 8 — Значения весового коэффициента  $a_{i,j}$

$j$	Скорость движения, км/ч,	Типы дорожных условий, $i$		
		I	II	III
1	5	0,003	0,003	0,010
2	10	0,004	0,004	0,039
3	15	0,007	0,007	0,115
4	20	0,012	0,012	0,217
5	25	0,020	0,020	0,264
6	30	0,031	0,031	0,207
7	35	0,045	0,045	0,148
8	40	0,061	0,061	0
9	45	0,077	0,077	0
10	50	0,092	0,092	0
11	55	0,101	0,101	0
12	60	0,104	0,104	0
13	65	0,100	0,100	0
14	70	0,090	0,090	0
15	75	0,076	0,076	0
16	80	0,060	0,060	0
17	85	0,044	0,044	0
18	90	0,030	0,030	0
19	95	0,043	0,043	0

Оптимизация проводится в пакете математических программ Mathworks MATLAB в наборе инструментов Optimization Toolbox (Оптимизация). Из-за особенностей реализации поиска значений целевой функции был выбран прямой симплексный метод (Нелдера–Мида). Условие сходимости было выполнено за 46 итераций.

Поверхности, заданные функциями:

$$f_{i,j}(k_n) = D_{z_{i,j}} + D_{\ddot{\varphi}_{i,j}} + \sum_{k=1}^3 (b_{i,j,k} P_{z_{ni,j,k}} + c_{i,j,k} P_{\dot{w}_{i,j,k}}), \quad (5)$$

входящими в состав целевой функции (4) под знаками суммирования без поправок на относительных пробегах в каждом режиме, построены на рисунках 7, 8, 9.

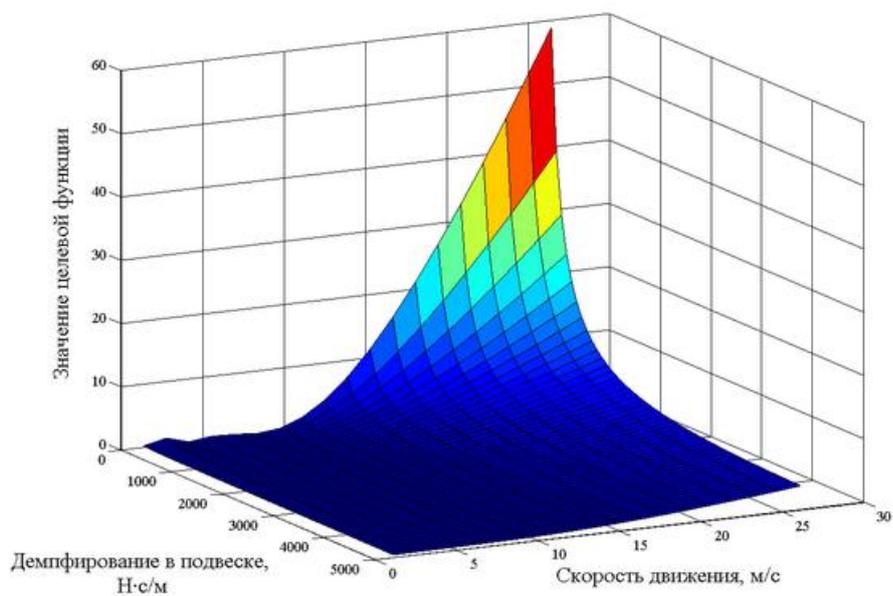


Рис. 7. Поверхность функции (5) при движении в дорожных условиях типа I

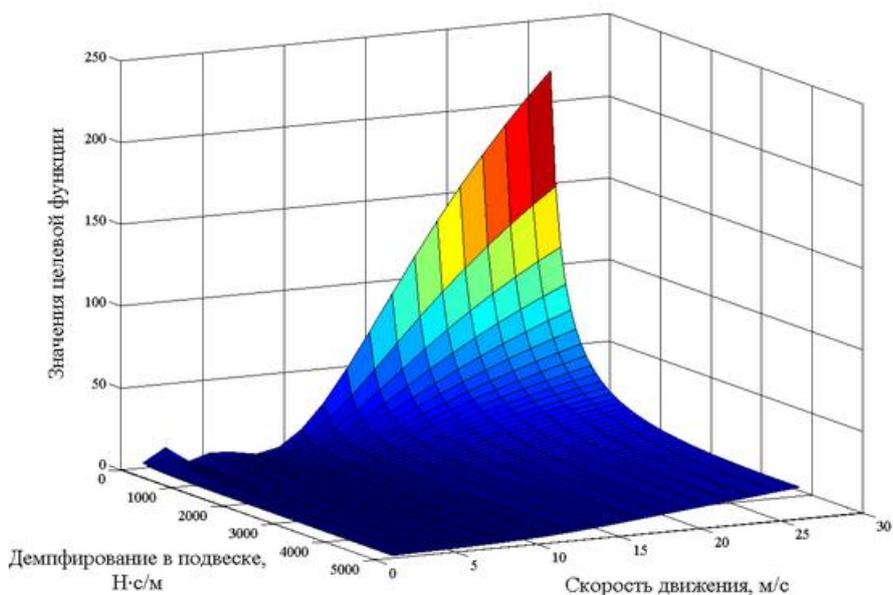


Рис. 8. Поверхность функции (5) при движении в дорожных условиях типа II

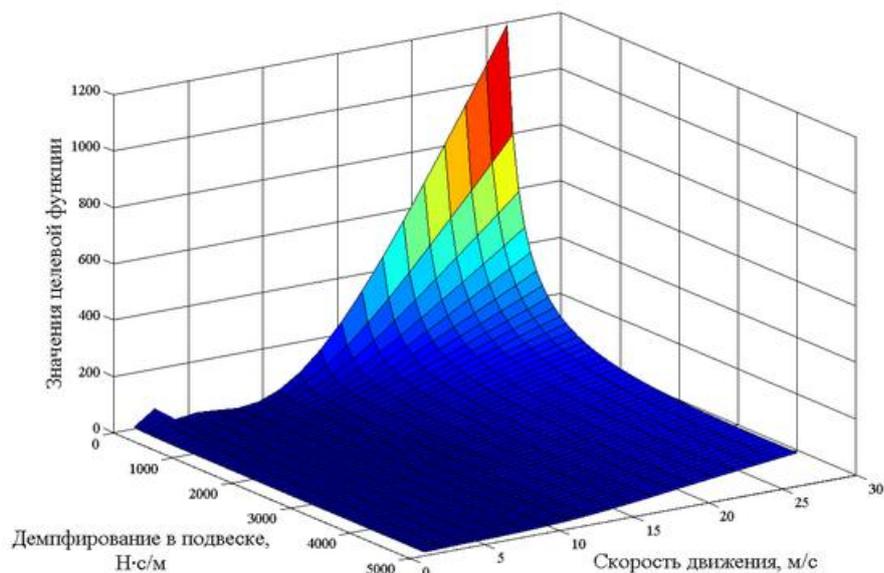


Рис. 9. Поверхность функции (5) при движении в дорожных условиях типа III

График целевой функции с точками, полученными в результате работы оптимизационного алгоритма, приведен на рисунке 10.

Определенное в результате оптимизационного алгоритма значение

$$k_{\Pi} = 2822,31150 \text{ Н·с/м}$$

относится к оси, а значит, для подвески одного колеса значение оптимального демпфирования составит

$$k_{\Pi\Pi} = 1411,15575 \text{ Н·с/м.}$$

Коэффициент относительного затухания колебаний, соответствующий полученному линейному коэффициенту демпфирования в подвеске, составит

$$\psi = \frac{k_{\Pi\Pi}}{2\sqrt{c_{\Pi} \cdot \frac{m_{\text{пм}}}{3}}} \approx 0,16 .$$

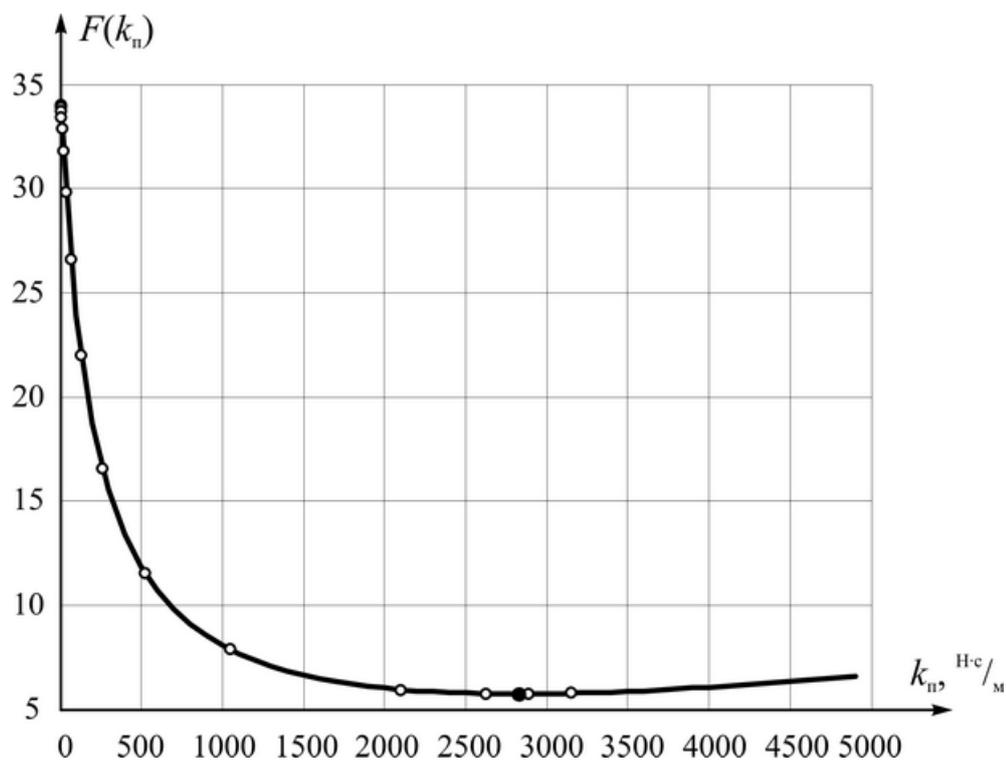


Рис. 10. График целевой функции

Полученный показатель коэффициента относительного затухания колебаний меньше рекомендованного в [1, 5, 6, 8, 10, 11], что дает предпосылки к оценке гистерезисного демпфирования, которое может предоставить рессора, выполненная из ПКМ с межлистовым материалом-заполнителем.

### Часть III. Анализ применения ПКМ в упругих и упругодемпфирующих элементах систем подрессоривания КМ

Перспективной областью применения высокопрочных полимерных композиционных материалов является изготовление элементов систем подрессоривания колесных машин. Преимуществами элементов ходовой части из ПКМ являются снижение массы, повышение долговечности ходовой части, а снижение массы неподдресоренных частей ходовой части увеличивает плавность хода, уменьшает нагрузки на несущую систему автомобиля.

Первые работы по применению ПКМ в производстве листовых рессор были проведены в 1960-х годах в США [15, 16, 17]. Созданная рессора из ПКМ была:

- легкой, прочной и долговечной (имея высокую потенциальную энергию деформации);

- экономичной в изготовлении;
- стойкой к воздействию факторов окружающей среды.

Для выполнения этих требований был специально разработан материал Liteflex, представляющий собой композицию из непрерывных стеклянных волокон и связующего на основе эпоксидной смолы. Предварительно были проанализированы различные составы, имеющие арматуру в виде стеклянных, углеродных, органических, борных волокон, а в качестве связующих — эпоксидные, полиэфирные, фенольные компоненты и различные термoplastы. Однолистовая рессора из этого материала (рисунок 11), установленная в задней подвеске легкового автомобиля «Chevrolet Corvette» в 1981 году, имела массу 3,6 кг и заменяла пакет из 10-ти листов поперечно расположенной металлической рессоры массой 18,6 кг. Схема независимой подвески с поперечной рессорой используется на Corvette до сих пор.



Рис. 11. Рессора Chevrolet Corvette из материала Liteflex

Поперечная рессора из композитного материала также использовалась или используется в следующих моделях автомобилей:

1. в задней подвеске Volvo 960 (только в модели универсал), Volvo S90, V90 (рисунки 12);
2. в передней подвеске автомобилей Mercedes-Benz Sprinter 1995 модельного года (рисунок 13);
3. платформы W General Motors (Lumina, Grand Prix, Regal, Cutlass Supreme);
4. платформы E General Motors (Eldorado, Toronado, Riviera, Reatta, Allante);
5. Mercedes Smart ForTwo (в настоящее время устанавливается рычажно-телескопическая подвеска).



Рис. 12. Стеклопластиковая рессора автомобилей Volvo

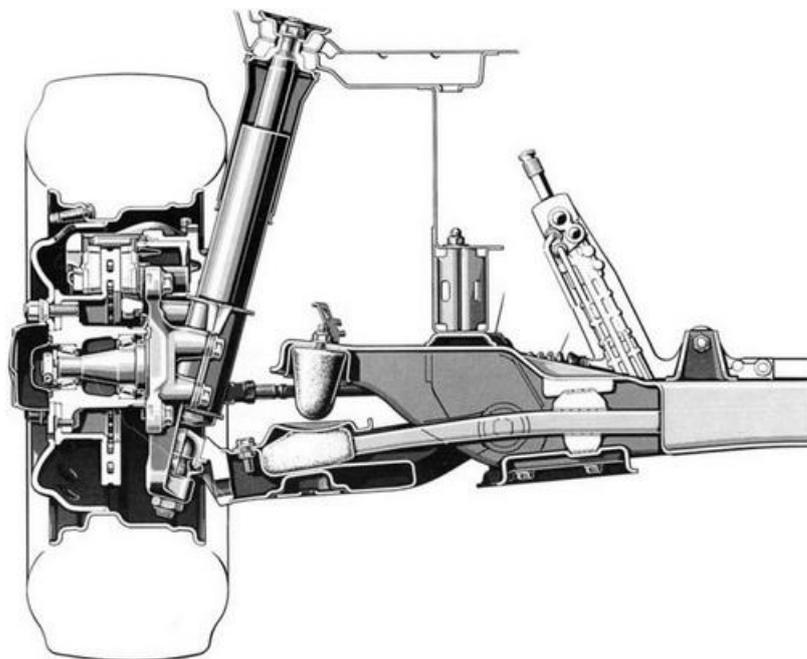


Рис. 13. Передняя подвеска автомобиля Mercedes-Benz Sprinter (1995)

В результате многочисленных исследований в США, Англии, Франции, Германии, Японии, СССР и других странах было установлено, что рессоры из ПКМ имеют ряд преимуществ по сравнению с металлическими:

1. снижение массы на 50...80 %;
2. повышение коррозионной стойкости в различных средах эксплуатации;
3. отсутствие межлистового трения и, как следствие, повышение комфортабельности, снижение шума;
4. повышение долговечности в 3–5 раз, снижение коэффициента замены и ремонта;

5. медленное разрушение рессоры за счет постепенного разрушения армирующих волокон (а не мгновенный излом, как при разрушении металлической рессоры);
6. возможность создания принципиально новой конструкции подвески.

Недостатки рессор из ПКМ – это структурная неоднородность материала и недостаточная стабильность параметров технологического процесса изготовления, приводящая к значительному рассеянию механических свойств ПКМ, достигающему 15...20 % относительно средних значений. К недостаткам рессор из ПКМ также относят их малую поперечную жесткость (в три раза меньше, чем у стальных рессор), которая приводит к необходимости увеличения их ширины в полтора раза. Кроме того, стеклопластики имеют в 10 раз меньшую, чем у стали, жесткость при кручении, что объясняется однонаправленной ориентацией армирующих волокон.

Возможны также конструкции рессор, выполненных из нескольких листов. Например, патент № 4468014 (США, 1982 г.) описывает конструкцию рессоры, состоящей из многослойной композиции, каждый элемент которой представляет собой пластиковый лист, закрепленный между двумя стальными листами (рисунок 14).

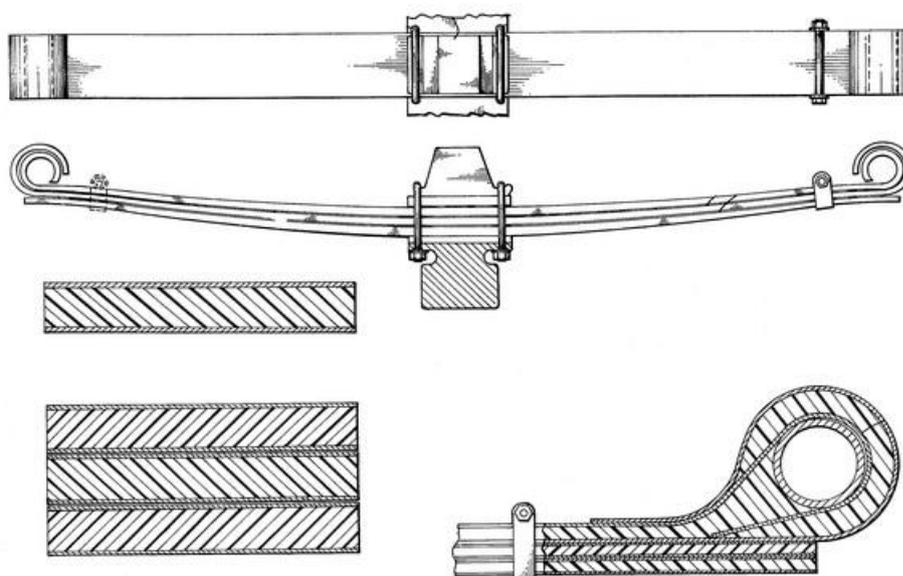


Рис. 14. Конструкция многослойной рессоры из ПКМ, форсированной стальными листами

Многими исследователями [19, 20, 21] предлагался вариант листовой рессоры из КПКМ с гибридными волокнами, т.е. сочетание стеклянных волокон с углеродными (или другими),

а также применение волокон различного диаметра (патент № 2125329 – Англия). При этом в зоне наибольших напряжений сжатия и растяжения (наружные слои) располагают углеродные волокна, а в средней части, где напряжения меньше, – стеклянные волокна или другой менее прочный материал (патент № 4688778 – США, рисунок 15).

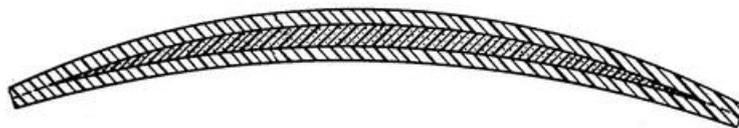


Рис. 15. Конструкция трехлистовой рессоры из ПКМ

Применяя гибридные волокна, можно получать различный «эффективный» модуль упругости  $EЭ$  [19], что как раз и важно при «вписывании» рессоры из КПКМ в подвеску серийно выпускаемого автомобиля взамен металлической.

С позиции применения ПКМ в качестве демпфирующих материалов в системе поддрессовывания автомобилей конструктивных решений, нашедших широкое применение, нет. Однако следует отметить несколько изобретений, касающихся совместного использования ПКМ и материалов с высокой степенью поглощения энергии колебаний в виброизоляторах. Например, патент № 4278726 (США, 1979 г.) описывает конструкцию демпфера, представляющего собой слоистую структуру, состоящую как минимум из одного жесткого неэластичного слоя и слоя вязкоупругого материала. Жесткий слой может быть выполнен из пластика, усиленного различными волокнами, а в качестве вязкоупругого материала может выступать вулканизируемый эластомер, усиленный пучками скрученных волокон (например, стальных). Между слоями может находиться слой-связка из стеклопластика или другого аналогичного ПКМ (рисунок 16).

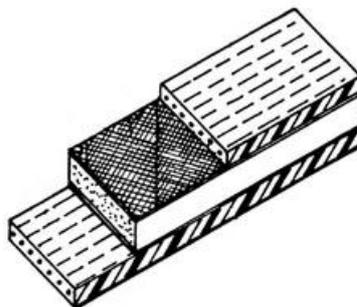


Рис. 16. Вязкоупругий многослойный демпфер

Патент № 4716986 (США, 1988 г.) описывает различные конструкции демпферов, состоящих из композиции материалов с различными мерами пластических деформаций. Демпферы могут иметь различную форму и структуру (рисунок 17).

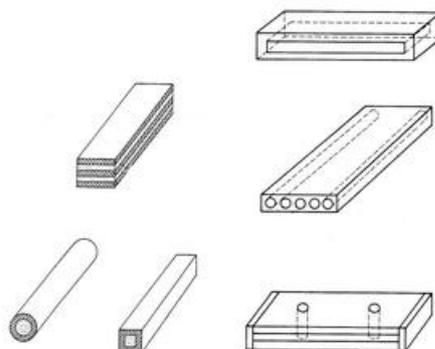


Рис. 17. Различные конструкции вязкоупругих демпферов

Существует также конструкция вязко-упругого амортизатора, представленная на рисунке 18, приведенная в патенте № 4026534 (США, 1977 г.). Амортизатор состоит из нескольких слоев вязкоупругого материала с тонкими листовыми пружинами между ними.

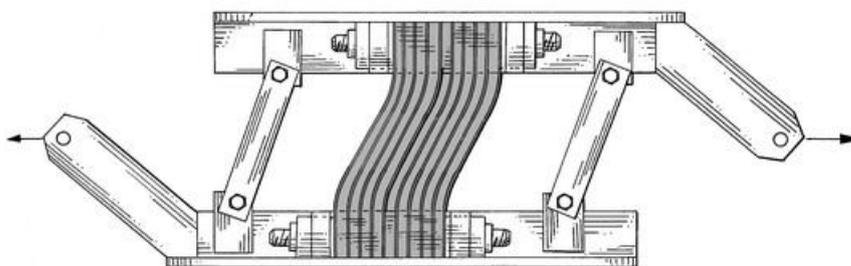


Рис. 18. Конструкция вязкоупругого амортизатора

Фирма Vertin провела сравнительные дорожные испытания задней подвески из КПМ собственной конструкции и серийной (торсионной) подвески на автомобиле одной и той же модели. Уровень воздействия со стороны дороги в автомобиле с новой подвеской оказался значительно ниже, управляемость на поворотах – лучше. Особенно хорошо автомобиль показал себя при движении на участках дороги с ухабами и неровностями, на поворотах дороги – из-за того, что поперечная рессора из КПМ противодействует крену автомобиля.

Применение данных подвесок облегчает техническое обслуживание и ремонт, замена ее осуществляется значительно проще, чем торсионов.

Применение КПМ в качестве демпфирующих элементов систем поддресоривания позволяет в некоторых случаях отказаться от гидравлического амортизатора. Преимуществами такого конструктивного решения станет лучшая характеристика демпфирования системы поддресоривания при высокочастотном возмущении, отсутствие жидкости, накладывающей ограничения на температурный диапазон, снижение снаряженной массы и массы недресоренных частей автомобиля.

## **Выводы**

Проведенный анализ показал, что ПКМ применяются в составе систем поддресоривания КМ в качестве упругих и направляющих устройств в тех случаях, когда требуется снижение снаряженной массы.

Для рассматриваемого класса транспортных средств, передвигающихся по грунтам со слабой несущей способностью с малыми скоростями на шинах сверхнизкого давления с меньшими показателями нормальной жесткости, оптимальное значение меры демпфирования оказывается меньше обобщенного среднестатистического показателя. Незначительной меры демпфирования в ПКМ, примененном в системе поддресоривания такого транспортного средства, может оказаться достаточно.

В дальнейшем, на примере ВТС «ЗЭТ 6х6», предлагается разработать методику прогнозирования вязкоупругих свойств и механического поведения листовых рессор из ПКМ. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. разработать математическую модель вязкоупругого поведения рессоры под нагрузкой;
2. провести верификацию и определить степень точности математической модели сравнением с экспериментальными исследованиями;
3. разработать метод определения вязкоупругих свойств рессоры в составе системы поддресоривания ВТС;

4. разработать методику определения качества системы поддрессоривания с упруго-демпфирующими элементами в частотной области и при имитационном моделировании;
5. разработать нелинейную пространственную имитационную модель ВТС с упруго-демпфирующими элементами системы поддрессоривания для решения широкого спектра задач, решение которых невозможно в частотной области и требующих учета нелинейных свойств направляющего устройства системы поддрессоривания.

#### **Библиографический список:**

1. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. – М., Машиностроение, 1972. – 392 с.
2. Колебания автомобиля. Испытания и исследования / под ред. Я.М. Певзнера. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
3. Проектирование полноприводных колесных машин: в 3-х кн. / под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – Т.1. – 2008. – 496 с.
4. Проектирование полноприводных колесных машин: в 3-х кн. / под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – Т.2. – 2008. – 528 с.
5. Проектирование полноприводных колесных машин: в 3-х кн. / под ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – Т.3. – 2008. – 432 с.
6. Жеглов Л. Ф. Спектральный метод расчета систем поддрессоривания колесных машин: учеб. пособие / Л. Ф. Жеглов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. – 150 с.
7. Савочкин В.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин / В.А. Савочкин, А.А. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.
8. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев, Г.В. Гольдин, Б.М. Додонов, В.П. Жигарев, В.И. Кольцов, В.С. Юрик, Е.И. Яковлев; под ред. А.А. Хачатурова. – М. : Машиностроение, 1976. – 535 с.
9. Котиев Г.О. Комплексное поддрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. баумана, 2010. – 184 с.
10. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Амортизаторы, шины и колеса / под ред. О.Д. Златовратского; пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
11. Reimpell J. The Automotive Chassis: Engineering Principles. – Butterworth-Heinemann, 2001. – 444 с.

12. ОСТ 37.001.275–84 «Автотранспортные средства. Методы испытаний на плавность хода». – М.: НАМИ, 1984. – 25 с.
13. ОСТ 37.001.291-84 «Автотранспортные средства. Технические нормы плавности хода». – М.: НАМИ, 1984. – 30 с.
14. ОСТ 37.001.472–88 «Приемочные испытания. Типовая программа». – М.: НАМИ, 1988. – 15 с.
15. Corvette's composite leaf spring will weight 80 percent Less // Production. – 1980. – April. – С. 67.
16. Corvette leaf spring: [Электронный ресурс]. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Corvette\\_leaf\\_spring](http://en.wikipedia.org/wiki/Corvette_leaf_spring). (Дата обращения: 22.02.2011).
17. Lamm, Michael. The Newest Corvette / Lamm, Michael: [Электронный ресурс]. URL: [http://temp.corvetteforum.net/c4/gcrouse/Suspension/fiberglass\\_spring.gif](http://temp.corvetteforum.net/c4/gcrouse/Suspension/fiberglass_spring.gif). (Дата обращения 22.02.2011).
18. Афанасьев, Б.А. Проектирование элементов подсистем автомобиля из композиционных материалов / Б.А. Афанасьев, И.З. Даштиев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 136 с.
19. Полилов А.Н. Особенности расчета композиционных листовых рессор / А.Н. Полилов, В.А. Савельев // Машиноведение. – 1988. – №1. – С. 35-41.
20. Савельев В.А. Композиционные материалы для листовых рессор // Автомобильная промышленность. – 1987. – №3. – С. 29-31.
21. Тимофеева С.Д. Полимерные композиционные материалы в автомобилестроении (обзор) // Пластические массы. – 1990. – №9. – С. 78-87.