

то развиваемый подход может рассматриваться, как методологическая основа прогнозного поиска новых конструктивно-технических решений с оценкой спектра их возможных динамических свойств.

### *Литература*

1. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П. Структурные интерпретации механических колебательных систем. Кулагинские чтения : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. Чита : ЧитГУ, 2007. С. 33-54.

2. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С.В. Елисеев, Ю.Н. Резник, А.П.Хоменко, А.А. Засядко. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2008. 523 с.

3. Драч М.А., Логунов М. А. Структурные подходы в динамике крутильных

колебательных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск : ИрГУПС. 2006. Вып. 2 (10). С. 72-84.

4. Драч М. А. Динамический синтез и моделирование в задачах оценки и изменения вибрационного состояния крутильных колебательных систем : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2006. 178 с.

5. Елисеев С. В., Драч М. А. Крутильные колебания в передачах как задачи виброзащиты и виброизоляции // Сб. тр. V Междунар. симпозиума по трибофатике. ISTF – 2005. Иркутск : ИрГУПС, 2005. Т. 2. С. 289-305.

6. Елисеев С. В., Волков Л. Н., Кухаренко В. П. Динамика механических систем с дополнительными связями. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1990. 214 с.

УДК 629.113

*С.П. Рыков\*, В.Н. Тарасюк*

### **ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН. ПОГЛОЩАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ**

*В статье обосновывается актуальность исследования выходных характеристик пневматических шин, выводится математическая модель поглощающей способности шин, оценка которой реализуется на колебательной системе, эквивалентной подвеске автомобиля. Модель подтверждается серией экспериментальных исследований шин легковых автомобилей в лабораторных условиях на универсальном шинном стенде.*

**Ключевые слова:** пневматическая шина, поглощающая способность, подвеска автомобиля, амплитудно-частотная характеристика, микропрофиль дорог, корреляционная функция, спектральная плотность, стенд, эксперимент.

**Актуальность.** К числу важнейших характеристик пневматической шины, в значительной мере определяющих упругие и амортизационные свойства, относятся поглощающая и сглаживающая способности. Свойство шины поглощать и рассеивать часть энергии, передаваемой через нее при колебаниях колеса, принято называть поглощающей способностью, а

свойство уменьшать подъем оси колеса по сравнению с высотой преодолеваемой неровности и увеличивать зону действия неровности на колесо – сглаживающей способностью. Эти два свойства шины, с одной стороны, отражают уровень совершенства ее конструкции (через коэффициент сопротивления качению), а с другой – влияют на качество подрессори-

\* - автор, с которым следует вести переписку.

вания, степень вибронегруженности и топливной экономичности автомобиля.

Исследованиями выходных характеристик шин занимались многие ученые как в России, так и за рубежом. Анализ литературных источников показывает, что в практике расчетов колебаний автомобиля для оценки поглощающих и сглаживающих свойств шин наибольшее распространение получили модель вязкостного сопротивления и модель постоянного сглаживания [1, 2]. Эти модели сыграли свою положительную роль в продвижении теории поддрессирования, в направлении сближения ее с реальной действительностью. И хотя вязкостная модель и модель постоянного сглаживания повышают эффективность расчетов в сравнении с традиционными инженерными методами расчета колебаний, они позволяют лишь сопоставить результаты теоретических исследований и потому нашли только частное применение.

В рамках внешней механики пневматической шины наиболее целесообразным направлением поиска более адекватных моделей поглощающей и сглаживающей способностей и их математического описания следует считать то, которое не приводило бы к существенному изменению традиционной структуры эквивалентных колебательных систем автомобиля, давало бы доступный для инженеров аппарат (в т. ч. с применением ЭВМ) для расчетов и анализа на стадии проектных оценок систем поддрессирования и в то же время основывалось не на априорном признании той или иной гипотезы о физической природе протекающих в шине процессов при качении и колебаниях колеса, а на реальных выходных характеристиках шины, получаемых экспериментально и отражающих ее свойства упругого, демпфирующего и сглаживающего элемента подвески.

**Построение модели.** Будем строить модель поглощающей способности шины, опираясь на гипотезы Н.Н. Давиденкова об упругом гистерезисе и Е.С. Соро-

кина о неупругой составляющей деформации. Согласно гипотезе Н.Н. Давиденкова, зависимость напряжения в материале от деформации при циклическом нагружении является степенной функцией и определяемой амплитудой, а не скоростью деформации [3]. А в соответствии с гипотезой Е.С. Сорокина при циклическом нагружении конструктивных материалов неупругая составляющая деформации отстает по фазе от упругой на  $90^0$  [4].

Исходя из этого, предлагаемая модель поглощающей способности строится по аналогии с моделированием гистерезисного трения в конструкционных материалах, т. е. путем математического описания экспериментальных характеристик нормальной жесткости шин [5]. Характер изменения таких характеристик жесткости, получаемых как в квазистатическом непрерывном, так и динамическом режимах нагружения колеса (рис. 1), дает основание аппроксимировать их уравнением эллипса вида

$$F = \pm F_a \sqrt{1 - (h_z/h_{za})^2}, \quad (1)$$

где  $F$ ,  $F_a$  – текущее и амплитудное значения силы неупругого сопротивления в шине;  $h_z$ ,  $h_{za}$  – текущее и амплитудное значения нормального прогиба шины.

Другим экспериментально подтвержденным фактом является функциональная зависимость амплитудных значений силы неупругого сопротивления от нормальной деформации шины (рис. 2), которая в самом общем виде может быть выражена степенной функцией

$$F_a = H_{ш} h_{za}^n, \quad (2)$$

где коэффициент пропорциональности  $H_{ш}$  и показатель степени  $n$  являются параметрами модели и отражают степень проявления поглощающих свойств шины.

При этом принимались следующие допущения:

1) средняя линия характеристики, отражающая упругие свойства шины,

должна изменяться по линейному закону, в зависимости от нормального прогиба;

2) силы неупругого сопротивления при ходе сжатия и ходе распрямления шины предполагаются равными;

3) сопряженные диаметры эллипса должны быть совмещены с осью, параллельной оси нагрузок, и средней линией характеристики;

4) размах аппроксимирующей кривой должен соответствовать максимальному прогибу шины на существенно важной части характеристики – ветви сжатия, которая расположена выше номинального уровня нагрузки.

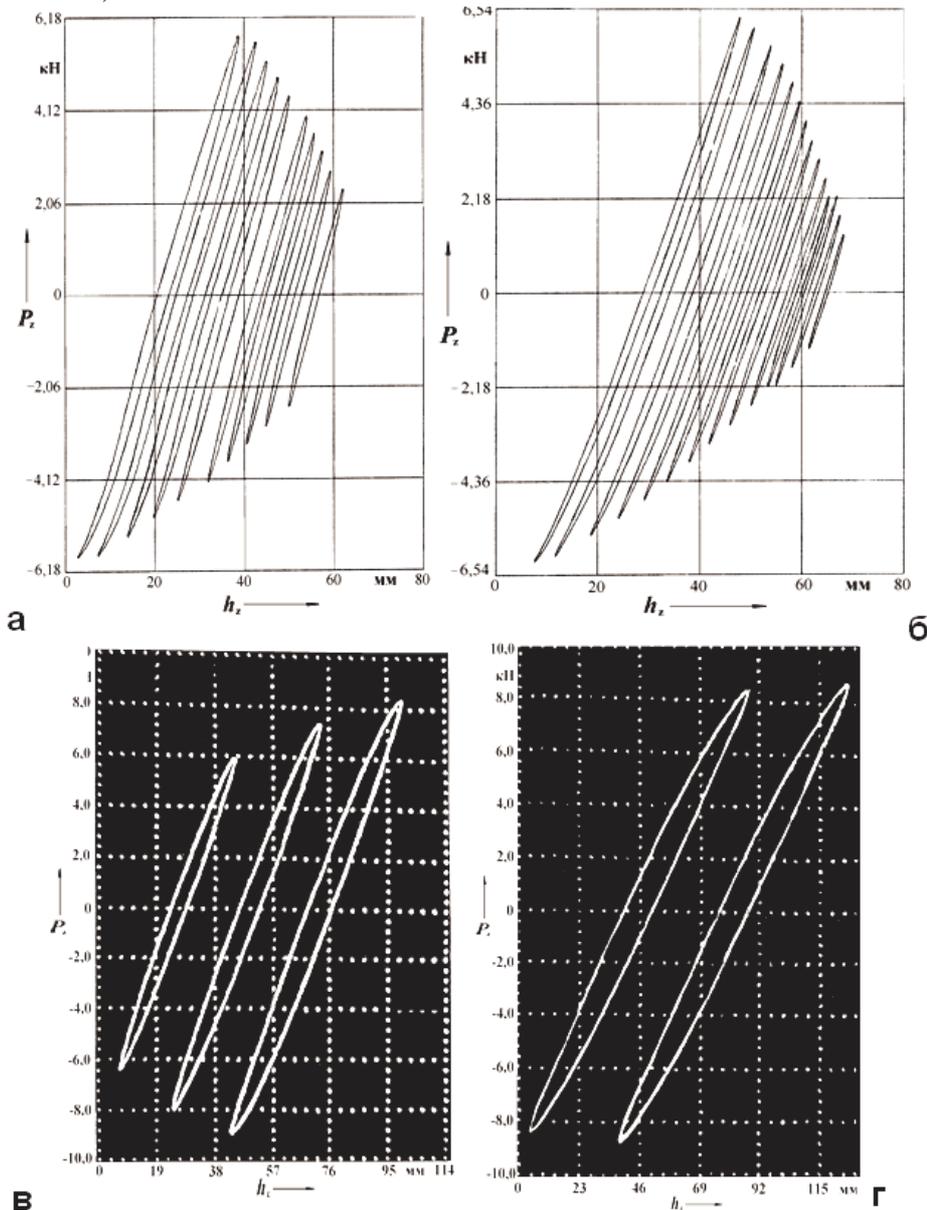
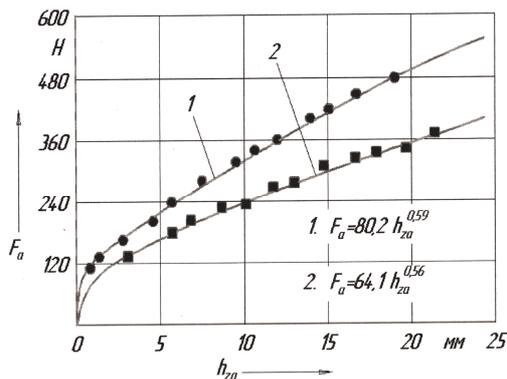


Рис. 1. Диаграммы с экспериментальными характеристиками нормальной жесткости шин, полученными в лаборатории испытания шин БрГУ (г. Братск) в квазистатическом непрерывном (а, б), динамическом без вращения (в) и с вращением (г) колеса режимах нагружения:

а – 8.40-15 Я-245 ( $P_{ZH} = 5,95$  кН,  $p_{WH} = 0,20$  МПа); б – 185R15 Я-288 ( $P_{ZH} = 6,35$ кН,  $p_{WH} = 0,32$  МПа); в – 245/70HR16 И-241 ( $P_{ZH} = 9,00$ кН,  $p_{WH} = 0,24$ МПа,  $p = 18$  рад/с), г - LR70-15 GL ( $P_{ZH} = 9,00$  кН,  $p_{WH} = 0,24$  МПа,  $p = 18$  рад/с,  $\omega_k = 172$  мин<sup>-1</sup> – для левой кривой).



**Рис. 2. Результаты обработки характеристик нормальной жесткости шин, построенных для различных размахов нагрузки:**

1 – шина 8.40-15 модели Я-245,  $P_{zh} = 5,95$  кН,  $p_{wh} = 0,20$  МПа; 2 – шина 7.00-15 модели И-89,  $P_{zh} = 6,15$  кН,  $p_{wh} = 0,22$  МПа.

Таким образом, математическое описание эллиптическо-степенной модели может быть представлено следующим уравнением:

$$F = H_{ш} h_{za}^n \sqrt{1 - (h_z / h_{za})^2} \text{sign} \dot{h}_z, \quad (3)$$

где  $\text{sign} \dot{h}_z$  – функция "знак  $\dot{h}_z$ ".

Поскольку эллиптическо-степенная модель поглощающей способности шины описывается нелинейным уравнением (3), ввод ее в дифференциальные уравнения движения даже простых колебательных систем автомобиля приводит к значительным вычислительным трудностям при получении решений в виде частотных характеристик.

Так как нелинейности, вносимые моделью силы неупругого сопротивления в шине, можно считать малыми, что показывают колебания реальных динамических систем испытательных стендов, практическое решение проблемы было найдено путем упрощения модели с использованием методов линеаризации и энергетического баланса.

**Упрощение модели.** Упрощение модели было ограничено выполнением двух условий. Во-первых, необходимо сохранить все оценочные параметры ( $H_{ш}$ ,  $n$ ), полученные при аппроксимации характеристик нормальной жесткости и отражающие суть новых представлений о неупругом сопротивлении в шине. Во-вторых, математическое выражение уп-

рощенной модели должно быть таким, чтобы при подстановке его в дифференциальные уравнения колебаний эквивалентных систем автомобиля любой сложности сохранить возможность их решения как аналитическими (в первую очередь, операторными), так и численными методами.

В результате теоретических исследований получены выражения:

– эквивалентного коэффициента  $\eta_{шэ}$  и силы вязкостного сопротивления  $F_B$

$$\eta_{шэ} = \frac{2H_{ш}}{n+1} \cdot \frac{1}{h_{zcm}^{1-n} p};$$

$$F_B = \frac{2H_{ш}}{n+1} \cdot \frac{1}{h_{zcm}^{1-n} p} \cdot \dot{h}_z; \quad (4)$$

– эквивалентного коэффициента  $\eta'_{шэ}$  и силы позиционного трения  $F_{II}$

$$\eta'_{шэ} = \frac{\pi H_{ш}}{n+1} \cdot \frac{1}{h_{zcm}^{1-n}};$$

$$F_{II} = \frac{\pi H_{ш}}{n+1} \cdot \frac{1}{h_{zcm}^{1-n}} \cdot h_z, \quad (5)$$

где  $h_{zcm}$  – статический прогиб шины под действием номинальной нагрузки на колесо;  $p$  – круговая частота воздействия на шину.

Для расчетов линейных динамических систем любого порядка с помощью методов операционного исчисления, например, преобразования Лапласа, целесообразно использовать эквивалентную силу вязкостного сопротивления (4).

В случае если колебательная система описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, и единственный путь их решения – применение численных методов, например метода Рунге-Кутты, целесообразно использовать эквивалентную силу позиционного сопротивления (5), поскольку в ее выражении не фигурирует частота.

**Оценка модели в расчетах.** Отработка новой модели для проверки правильности теоретических положений, принятых при ее математическом описании, а также разработка методов расчетной оценки поглощающей способности шин

осуществлялась на колебательной системе, эквивалентной подвеске автомобиля, которая достаточно проста для анализа и узнаваема как в аналитическом выражении, так и в графическом отображении своих частотных характеристик, и одновременно представительно отражает основные свойства колебательной системы автомобиля в целом.

Построение функциональной схемы подвески с вводом новой модели неупругого сопротивления в шине (рис. 3) и составление дифференциальных уравнений движения ее масс основываются на общепринятых допущениях [5].

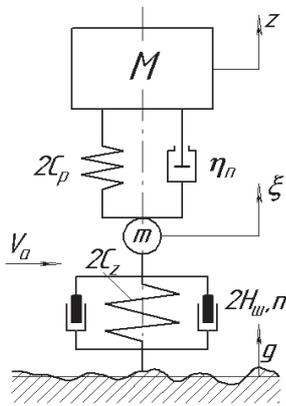


Рис. 3. Функциональная схема колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля, в которой отражена поглощающая способность шины.

На рисунке 3 обозначены:  $M$  – приведенная поддрессоренная масса, входящая на подвеску;  $2C_p$  – суммарный коэффициент нормальной жесткости упругих элементов подвески;  $\eta_n$  – коэффициент суммарного сопротивления в подвеске (сопротивление амортизаторов и трение в сочленениях);  $m$  – неподдрессоренная масса моста, части деталей направляющего устройства и упругого элемента подвески;  $2C_z$  – суммарный коэффициент нормальной жесткости пневматических шин;  $2H_{ш, n}$  – параметры эллиптически-степенной модели неупругого сопротивления в шинах;  $z, \xi$  – вертикальные перемещения поддрессоренной и неподдрессоренной масс;  $q$  – текущее значение

ординат микропрофиля поверхности дороги под осью колес.

Дифференциальные уравнения движения масс подвески имеют вид

$$\begin{cases} \ddot{x} + \ddot{h}_z + 2k\dot{x} + \Omega^2 x = -\ddot{q}; \\ \ddot{h}_z + R_{ш} h_{za}^n \sqrt{1 - \left(\frac{h_z}{h_{za}}\right)^2} \text{sign} \dot{h}_z + \\ + \omega^2 h_z - \frac{2k}{\mu} \dot{x} - \frac{\Omega^2}{\mu} x = -\ddot{q}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $k = \eta_n/2M$ ;  $\Omega = \sqrt{2C_p/M}$ ;  $\omega = \sqrt{2C_z/m}$ ;  $\mu = m/M$  – колебательные параметры подвески;  $R_{ш} = 2H_{ш}/m$  – приведенный показатель неупругого сопротивления в шинах;  $x = z - \xi$  – прогиб рессор;  $h_z = \xi - q$  – нормальный прогиб шин.

Предполагая нелинейность системы (8) в малом, решение ее ищем в виде гармонических функций при входном воздействии гармонического вида  $q = q_0 \sin pt$ . При этом условии удается получить аналитические выражения частотных характеристик колебательной системы относительно прогиба рессор  $|H|_x, \Phi_x$  и нормального прогиба шин  $|H|_h, \Phi_h$  в виде трансцендентных уравнений:

Расчет частотных характеристик подвески по этим уравнениям осуществлялся на компьютере с использованием итерационного метода Ньютона-Рафсона.

Результаты вычислений амплитудно-частотных характеристик для передней подвески грузового автомобиля ЗИЛ по выходу прогиба рессор, представленные на рис. 4, показали, что ввод в расчет эллиптически-степенной модели поглощающей способности шин приводит к заметному снижению амплитуд колебаний, особенно в области резонансных частот (порядка 10÷17%). Была доказана также возможность использования только одной кривой из семейства АЧХ для наиболее представительной неровности высотой  $2q_0 = 10$  мм; из двух параметров

модели влияние на изменение частотных характеристик коэффициента  $H_{ш}$  более значительное, чем показателя степени  $n$ .

Для аналитического расчета реакции подвески с использованием ее амплитудно-частотной характеристики необходимо задание случайного микропрофиля спектральной плотностью, которая сравнительно легко может быть получена с помощью функционального преобразования Фурье корреляционной функции. С этой целью были аппроксимированы эмпирически полученные и приводимые в литературе корреляционные функции трех испытательных дорог автополигона НИЦИАМТа выражениями вида:

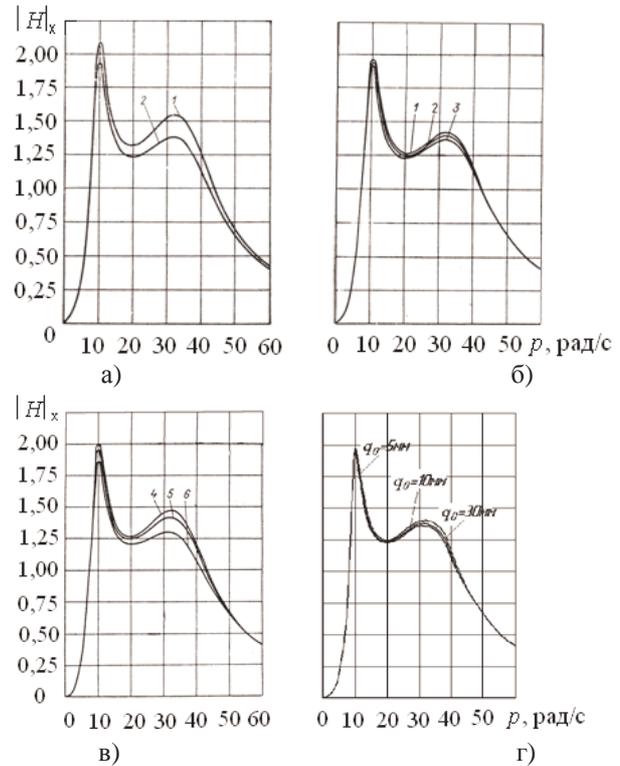
$$\rho(\Delta l) = A_1 e^{-\alpha_1 |\Delta l|} + A_2 e^{-\alpha_2 |\Delta l|} \cos \beta_1 |\Delta l| + A_3 e^{-\alpha_3 |\Delta l|} \cos \beta_2 |\Delta l|, \quad (7)$$

где  $A_i$  – коэффициенты, характеризующие распределение дисперсии ординат поверхности между составляющими ( $A_1 + A_2 + A_3 = 1$ );  $\alpha_i$  – параметры, характеризующие быстроту затухания корреляционной связи ординат микропрофиля;  $\beta_i$  – волновые частоты гармонических составляющих микропрофиля.

Моделирование корреляционных функций осуществлялось численными методами с использованием стандартного программного обеспечения. Вычисленные значения коэффициентов нормированных корреляционных функций трех испытательных дорог сведены в табл. 1.

Используя преобразование Фурье уравнения (7), полученные выражения частотных характеристик и основное соотношение статистической динамики линейных систем автоматического регулирования – уравнение Винера-Хинчина,

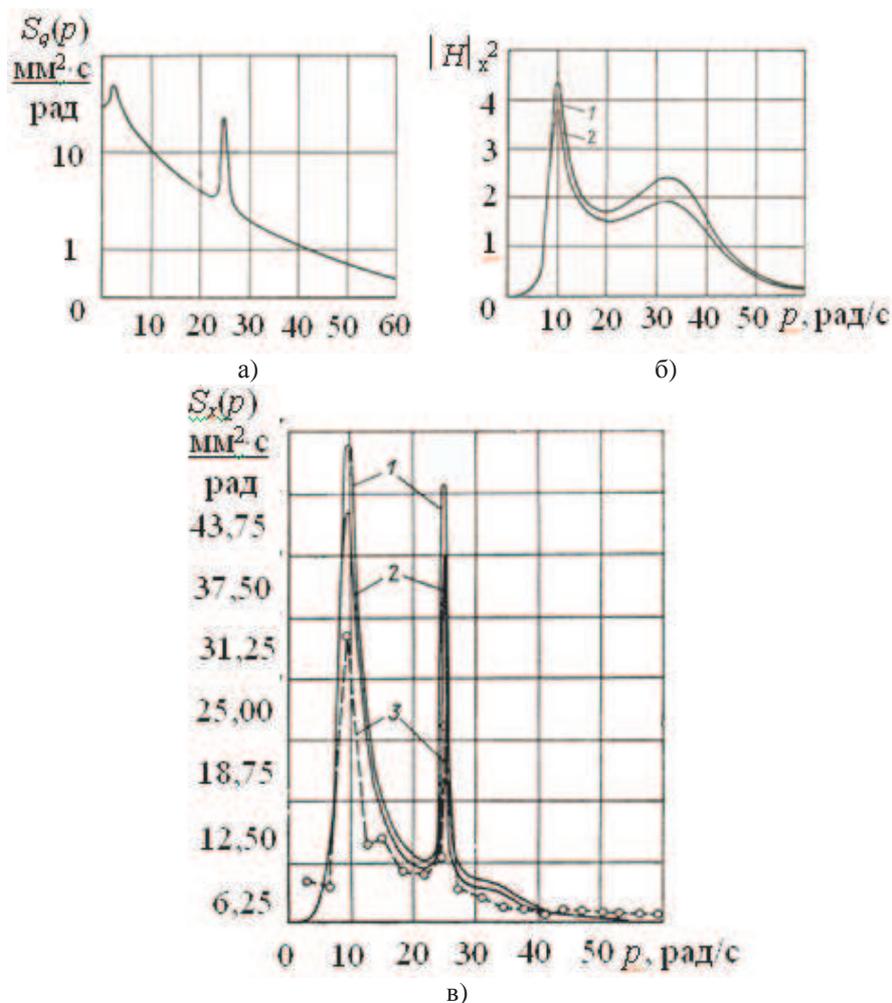
были получены аналитические выражения и проведен численный расчет спектральных характеристик колебаний передней подвески грузового автомобиля повышенной проходимости ЗИЛ по прогибам рессор при движении по испытательным дорогам автополигона.



**Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики передней подвески грузового автомобиля ЗИЛ по выходу прогиба рессор:**  
 а – учет эллиптическо-степенной модели; 1 – без учета, 2 – с учетом; б – влияние показателя степени  $n$ ; 1 –  $n = 0,7n_n$ , 2 –  $n_n$ , 3 –  $n = 1,3n_n$ ; в – влияние коэффициента пропорциональности  $H_{ш}$ ; 4 –  $H_{ш} = 0,7H_{шн}$ , 5 –  $H_{шн}$ , 6 –  $H_{ш} = 1,5H_{шн}$ ; г – влияние высоты неровностей  $q_0$ .

Таблица 1

Испытательная дорога	Дисперсия ординат микропрофиля $D_q, \text{мм}^2$	Параметры аналитической аппроксимации нормированной корреляционной функции							
		$A_1$	$A_2$	$A_3$	$\alpha_1, \text{м}^{-1}$	$\alpha_2, \text{м}^{-1}$	$\alpha_3, \text{м}^{-1}$	$\beta_1, \text{м}^{-1}$	$\beta_2, \text{м}^{-1}$
Бульжная ровного замощения	258	0,25	0,35	0,4	0,79	0,05	0,29	0,449	0,076
Бульжная профилированная	570	0,89	0,37	-0,26	0,59	0,05	0,38	0,766	0,924
Бельгийская мостовая	850	0,75	0,2	0,05	0,8	0,09	0,03	0,247	0,244



**Рис. 5. Результаты расчетов спектральной плотности прогибов рессор передней подвески грузового автомобиля ЗИЛ при испытаниях на «бельгийской» мостовой со скоростью 40 км/ч (окончание):**

а – спектральная плотность воздействия микропрофиля; б – квадрат амплитудно-частотной характеристики подвески; в – спектральная плотность прогиба рессор; 1, 2 – расчетные спектры без учета и с учетом поглощающей способности шин; 3 – экспериментальный спектр.

На графики расчетных спектральных плотностей накладывались для сравнения энергетические спектры колебаний, полученные в результате ходовых испытаний этого же автомобиля на дорогах автополигона (г. Дмитров) (рис. 5).

Анализ и сравнение расчетных энергетических спектров с экспериментальными спектрами показывает, что ввод поглощающей способности шин в расчет колебаний автомобиля существенно приближает расчет к эксперименту, а теоретическая модель неупругого сопротивления в шине, включенная в эквивалентную систему подвески, является удовлетвори-

тельным отображением сложного, но доступного для исследования процесса поглощения энергии в шине при изменении ее радиальной деформации.

**Оценка модели в эксперименте.** Лабораторные испытания пневматических шин проводились с целью решения следующих задач: во-первых, необходимо было экспериментально подтвердить правильность теоретических положений, на которых строится эллиптическо-степенная модель поглощающей способности шины для различных режимов испытаний; во-вторых, определить функциональные зависимости параметров

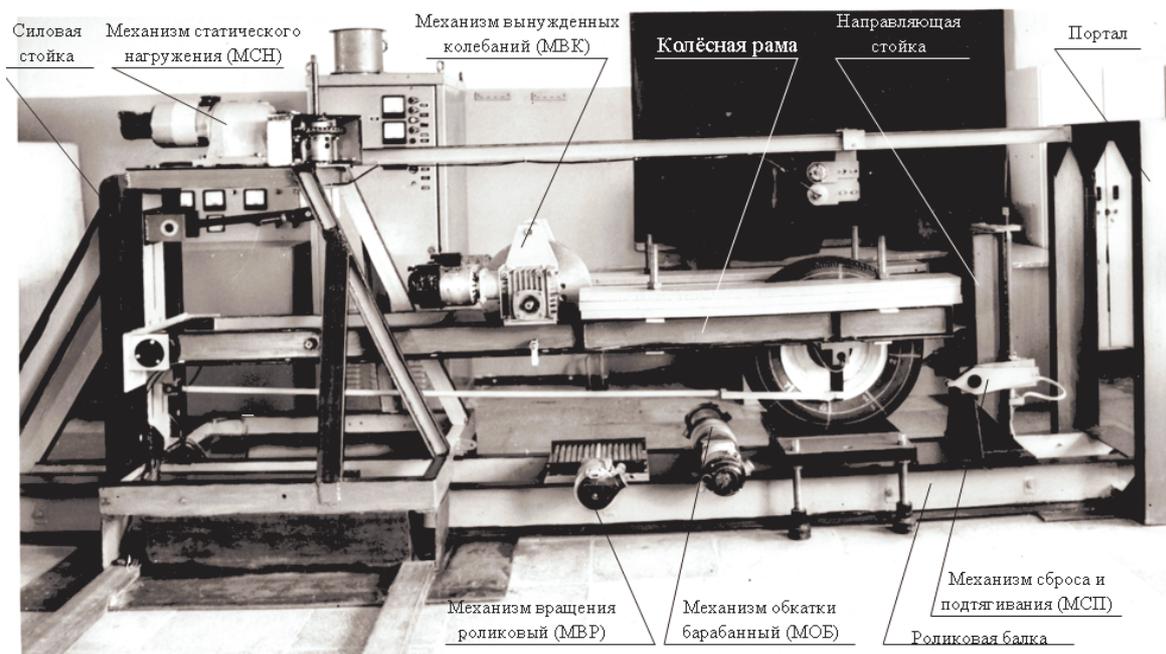


Рис.6 Общий вид шинного стенда ШС-77

разработанной модели от параметров эксплуатационного состояния, особенностей конструкции и режимов нагружения испытуемых шин. Экспериментальные исследования шин осуществлялись на испытательном комплексе, разработанном и внедренном на кафедре автомобильного транспорта БрГУ (г. Братск) (рис. 6) [6].

Основной вывод, который следует из анализа результатов испытания шин в квазистатическом режиме нагружения колеса, заключается в том, что с уменьшением внутреннего давления воздуха в шине  $p_w$  и увеличением уровня статической нагрузки  $P_{zc}$  и температуры покрышки  $T_{ш}$  ее поглощающая способность возрастает. Об этом свидетельствует рост амплитудных значений прогиба  $h_{za}$  и силы сопротивления  $F_a$  и, следовательно, площади характеристик жесткости. При этом параметры эллиптическо-степенной модели  $H_{ш}$ ,  $n$  остаются неизменными, т. е. не зависят от величины давления, нагрузки и температуры, по крайней мере в диапазоне изменения, реализованном в эксперименте. Такой вывод обосновывается малой шириной полосы рассеяния экспериментальных данных около аппроксимирующих кривых, которая не

превышает  $\pm 4,5\%$  от диапазона изменения.

Вывод, который можно сделать по результатам испытания шин в режиме свободных затухающих колебаний, заключается в том, что обработка опытных осциллограмм согласно скорректированной методике, т. е. по соотношению полных размахов, позволяет оценить параметры исходной модели  $h_{ш}$  и  $n$  с приемлемой точностью, а их значения вполне соответствуют как теоретическим предпосылкам построения модели, так и результатам предыдущего эксперимента.

Результаты испытания шин в динамическом режиме нагружения с частотами 6-38 рад/с на не вращающемся колесе дают основание сделать следующие выводы:

1) закономерности изменения нагрузочной и разгрузочной ветвей характеристик нормальной жесткости шин, построенных в динамическом режиме нагружения колеса, еще в большей степени, чем закономерности характеристик жесткости, построенных в квазистатическом режиме нагружения, приближаются к уравнению эллипса с большим эксцентриситетом;

2) между амплитудными значениями силы неупругого сопротивления и соответствующими прогибами шины для характеристик жесткости, построенных в динамическом режиме при различных размахах нагрузки, наблюдается закономерность, которая с достаточной точностью может быть аппроксимирована степенной функцией, как и в случае квазистатического режима нагружения колеса;

3) при переходе от квазистатического режима нагружения не вращающегося колеса к динамическому поглощающая способность шины значительно возрастает, что подтверждается как увеличением максимальной силы неупругого сопротивления  $F_a$ , так и площади характеристик жесткости  $P_{\text{хар}}$  при одинаковых значениях размаха нагрузки и прогиба шины. Например, для шины 185R15 модели Я-288 при колебаниях вертикальной нагрузки с частотой около 6 рад/с  $F_a$  увеличивается приблизительно в 4 раза по сравнению с квазистатическим нагружением;

4) дальнейшее увеличение частоты нагружения не вращающегося колеса вертикальной силой (примерно до 38 рад/с) не сказывается на изменении поглощающей способности шин, поскольку и сила неупругого сопротивления  $F_a$ , и площадь характеристик жесткости  $P_{\text{хар}}$  при одинаковых размахах нагрузки остаются практически неизменными.

5) коэффициент нормальной жесткости  $C_z$  испытанных шин при переходе от квазистатического режима нагружения к динамическому, а также при увеличении частоты нагружения не вращающегося колеса до 38 рад/с практически остается неизменным; рассеяние значений коэффициента около среднего уровня не превышает  $\pm 5,5\%$ .

Режим динамического нагружения шины на вращающемся колесе был реализован на стенде только при синхронизации этих процессов. Сравнение построенных характеристик жесткости позволяет сделать следующие выводы:

1) вращение колеса синхронно с изменением нормальной нагрузки не приводит к существенным изменениям поглощающей способности шин, о чем свидетельствуют практически неизменные значения ширины и площади характеристик;

2) коэффициент нормальной жесткости при вращении колеса также не изменяется, поскольку практически совпадают значения углов наклона средней линии характеристик жесткости;

3) некоторое ( $\sim 3,5\%$ ) уменьшение ширины характеристик и размаха прогиба шин для вращающегося колеса объясняется тем, что часть энергии двигателя виброустановки затрачивается на преодоление сопротивления качению колеса по роликовой площадке.

Анализ результатов экспериментов при комплексном нагружении колеса позволяет сделать следующие обобщения:

1) догружение колеса продольной силой (крутящим моментом) при одновременном действии нормальной нагрузки приводит к увеличению нормальной жесткости шин как диагональной, так и радиальной конструкции;

2) догружение колеса боковой силой при одновременном действии нормальной нагрузки приводит к уменьшению нормальной жесткости шин;

3) закономерности изменения коэффициента нормальной жесткости от бокового упругого смещения и угла закрутки колеса носят линейный характер, по крайней мере в диапазоне работы шин без проскальзывания;

4) по своему влиянию на поглощающую способность шины продольное догружение колеса эквивалентно повышению внутреннего давления воздуха, а боковое догружение – наоборот, снижению. Это проявление комплексного нагружения колеса дает основание утверждать, что параметры эллиптической-степенной модели  $H_{\text{ш}}$  и  $n$  не будут зависеть ни от величины угла закрутки, ни от величины бокового упругого смещения в указанном диапазоне их изменения, так же, как и от величины внутреннего давления воздуха.

Сводные результаты испытания отобранных шин в трех режимах нагружения колеса.

Размеры и модель шины	Параметры эксплуатационного состояния		Параметры поглощающих свойств					
			Квазистатический режим		Режим свободных колебаний		Динамический режим	
	$P_{ZH}$ , кН	$P_{WH}$ , МПа	$H_{ш}$ , кН/м <sup>n</sup>	n	$H'_{ш}$ , кН/м <sup>n</sup>	n	$H_{ш}$ , кН/м <sup>n</sup>	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9
245/70H R16 И-241 «Гранит»	9,0	0,24	2,32	0,49	8,68	0,48	10,48	0,49
245/70H R16 И-241 «Гранит» (износ 57 %)	9,0	0,24	1,83	0,49	8,66	0,50	9,17	0,49
LR78-15 Super Aramid Radial	9,0	0,24	1,14	0,43	4,57	0,42	5,30	0,43
LR70-15 Golden Lif-saver	9,0	0,24	1,23	0,47	5,67	0,48	6,41	0,47
185R15 Я-288	6,35	0,32	3,12	0,60	13,32	0,61	14,12	0,60
7.00-15 И-89	6,15	0,22	3,07	0,56	11,98	0,58	13,81	0,56
8.40-15 Я-245	5,95	0,20	5,22	0,59	17,48	0,60	21,64	0,59
7.35-14 ИД-195	4,35	0,17	2,00	0,48	6,90	0,49	8,31	0,48

**Результаты и выводы.** Обобщая результаты исследований поглощающей способности пневматических шин, можно сделать следующее заключение:

1. Эллиптическо-степенная модель поглощающей способности пневматической шины не связывает себя с априорным признанием какой-либо гипотезы о физической природе сил трения или их сочетания, а строится на математическом описании реально наблюдаемых закономерностей исходной экспериментальной информации – характеристик нормальной жесткости и кривых затухающих колебаний.

2. Проведенные преобразования модели поглощающей способности шины с

применением методов линеаризации и энергетического баланса позволили упростить ее математическое описание так, чтобы при вводе в дифференциальные уравнения колебаний эквивалентных систем автомобиля не усложнять процесс их решения как аналитическими, так и численными методами более, чем при использовании вязкостной модели силы трения, не снижая при этом точности решения и адекватности представления поглощающих свойств шины, характерных для исходной модели.

3. Исследование расчетных амплитудно-частотных характеристик на примере подвесок грузового и легкового автомобилей ЗИЛ показало, что из двух пара-

метров модели основное влияние на изменение характеристик оказывает коэффициент пропорциональности  $H_{ш}$ ; влияние показателя степени  $n$  существенно меньше. Так же незначительно влияние на изменение характеристик интенсивности возмущающего воздействия реально встречающихся неровностей дороги. Поэтому для статистических расчетов колебаний масс вполне достаточно использования одной характерной кривой из семейства АЧХ, полученных с учетом поглощающей способности шин, для всего диапазона амплитуд встречающихся неровностей.

4. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований на примере грузового автомобиля повышенной проходимости ЗИЛ показало, что теория случайных колебаний подвески с учетом поглощающей способности шин согласно эллиптическо-степенной модели приближает расчетные статистические характеристики происходящих процессов к аналогичным характеристикам, полученным из наблюдений и измерений в натурном эксперименте.

5. Исследованная теоретическая модель поглощающих свойств автомобильных шин, включенная в эквивалентную систему подвески, является удовлетворительным отображением сложного, но доступного для анализа процесса поглощения энергии в шинах при изменении их радиальной деформации.

6. В результате экспериментальных исследований пневматических шин в лабораторных условиях были подтверждены допущения, принятые при математическом описании эллиптическо-степенной модели. Было доказано, что параметры модели являются константами для конкретной шины, т. е. не зависят от ее эксплуатационного состояния (внутреннего давления воздуха, уровня статической нагрузки, температуры покрышки) и режима нагружения (частоты изменения вертикальной нагрузки, скорости качения колеса), по крайней мере, в диа-

пазонах изменений, реализованных в эксперименте.

При ужесточении требований к силовой неоднородности параметры модели будут являться константами для всех шин одного типоразмера и даже шин разных фирм-производителей.

Это свойство параметров эллиптическо-степенной модели значительно облегчает их определение и использование в расчетах эквивалентных колебательных систем автомобиля, поскольку достаточно один раз тщательно оценить их значения для одной шины конкретного типоразмера, чтобы занести в технические данные всех шин таких же размеров и модели с указанием величины среднего квадратического отклонения.

7. Эллиптическо-степенная модель позволяет описать поглощающую способность шины по результатам испытаний в различных режимах нагружения колеса (квазистатическое нагружение, свободные колебания, динамическое нагружение без вращения и с вращением колеса), при этом ее параметры могут быть приведены один к другому.

Это свойство модели позволяет определить ее параметры, соответствующие реальному режиму нагружения шины – динамическому с вращением колеса, по результатам более простого эксперимента, например, эксперимента при квазистатическом непрерывном нагружении или еще более простого – в режиме свободных колебаний.

### *Литература*

1. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля: Колебания и плавность хода. 3-е М.: Машиностроение, 1972. 392 с.
2. Яценко Н. Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин. М.: Машиностроение, 1978. 132 с.
3. Давиденков Н. Н. О рассеянии энергии при вибрациях // Журнал техн. физики. 1938. Т. VIII. № 6. С. 156–161.
4. Сорокин Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем.

М.: Акад. строит. и архит. СССР, 1960. 132 с.

5. Рыков С. П. Моделирование и оценка поглощающей и сглаживающей способности пневматической шины в расчетах подвески, плавности хода и подрессоривания автомобиля. Братск : БрГТУ, 2004. 124 с.

6. Рыков С. П. Экспериментальные исследования поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин : Испытательный комплекс, методики проведения экспериментов и обработки результатов. Братск : БрГТУ, 2004. 322 с.

УДК 621.891;621.646

*П.М. Огар\*, Д.Б. Горохов*

### **КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ: ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД**

*Разработана методика эффективного моделирования профиля и шероховатой поверхности на основе функции Вейеритрасса-Мандельброта путем варьирования фрактальных параметров с использованием ЛПт-последовательностей. Предложены математическая модель фрактальной шероховатой поверхности, математическая модель контакта жесткой шероховатой поверхности с упругим полу-пространством. Получено выражение для определения фрактальной размерности эквивалентной шероховатой поверхности в зависимости от фрактальных размерностей контактирующих поверхностей и максимальных высот неровностей.*

**Ключевые слова:** шероховатая поверхность, моделирование, упругий контакт, фрактальная размерность, поверхность.

Эксплуатационные свойства деталей машин во многом определяются микро- и макрогеометрией контактирующих поверхностей и величиной приложенной нагрузки. Изначально топография деталей машин традиционно рассматривалась как случайный стационарный процесс. Впервые такой подход был использован в работе [1], где авторы анализировали упругий контакт двух шероховатых поверхностей, исследуя плоскую поверхность в нормальном контакте с эквивалентной шероховатой поверхностью, состоящей из сферических неровностей постоянного радиуса, равного среднему радиусу кривизны исходных поверхностей. Предполагая нормальное распределение высот неровностей и распределение неровно-

стей в соответствии с известной плотностью материала, для нормальной нагрузки были получены выражения для количества контактных площадок, средней площади контакта, фактической площади контакта и зазора между поверхностями. Этот подход был развит в работах [2, 3 и др.].

Дальнейшее развитие теория контакта реальных поверхностей получила при использовании дискретной модели шероховатости [4, 5, 6 и др.], отличительной особенностью которой являются параметры распределения, выбирающиеся не на основе принятых допущений, а определяемых экспериментально в результате обработки профилограммы, исходя из значений микрогеометрии.