

Соколовский С.А.¹, Коханенко В.Б.², к.т.н., Яковлев А.Н., к.т.н.²

1 – Академия внутренних войск МВД Украины, г. Харьков;

2 – Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков

ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ШИН

Обобщены результаты анализа литературных источников по теоретическим и экспериментальным исследованиям поглощающей способности пневматических шин, по моделированию сил неупругого сопротивления в материалах конструкции. Определено, что в большинстве исследований по плавности хода и вибронгруженности автомобиля оценка поглощающей способности пневматической шины осуществляется с использованием вязкой модели силы неупругого сопротивления.

Вступление

Пневматические шины существенно влияют на основные эксплуатационные характеристики автомобиля. К этим характеристикам принято относить тяговые и тормозные свойства, управляемость и устойчивость, шум и топливную экономичность, а также плавность хода. При исследовании влияния свойств и параметров пневматических шин на характеристики автомобиля используют экспериментальные и теоретические методы анализа динамической системы «дорога–шина–автомобиль».

Постановка проблемы

Во-первых, современные методы разработки и доводки автомобильной техники, ориентированные на широкое применение вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования, позволяют уже на стадии проектного задания исследовать и совершенствовать его системы поддрессоривания и виброзащиты, а также оценивать показатели и характеристики плавности хода и нагруженности несущей системы. Однако, узким местом использования программных систем по-прежнему является отсутствие адекватных, теоретически и экспериментально обоснованных моделей, учитывающих преобразующие свойства пневматической шины и, особенно, ее поглощающую способность.

Во-вторых, актуальной является перспективная задача, связанная с исследованием и конструированием шин, способных частично или даже полностью взять на себя функции подвески за счет значительного проявления сглаживающего эффекта и возможности воспринимать и рассеивать энергию от воздействия неровной дороги.

В-третьих, актуальность проблемы определяется потребностями форсированных испытаний автомобилей на специальных дорогах автополигонов.

В-четвертых, такой же важной проблемой является учет поглощающей способности шин при оценке нагруженности элементов трансмиссии и ходовой части автомобиля.

Анализ последних достижений и публикаций

Поглощающая способность пневматических шин, моделирование сил неупругого сопротивления в материалах их конструкций изложены в работах [1–20].

Постановка задачи и ее решение

Дальнейшее совершенствование конструкции шин и повышение их надежности необходимо строить на научном осмыслении как внешней формы и внутреннего устрой-

ства, так и той роли, которую играет пневматическая шина в обеспечении плавности хода, устойчивости и управляемости автомобиля, в нагруженности его несущей системы.

Свойство пневматической шины поглощать и рассеивать часть энергии, передаваемой через нее при колебаниях колеса, принято называть поглощающей или демпфирующей способностью. Эта способность шины неодинакова при колебаниях ее деформации в вертикальном, продольном и боковом направлениях.

Наибольший практический интерес представляют исследования поглощающей способности шины при вертикальных (радиальных) колебаниях нагрузки.

В работе [1], выполненной в Тольяттинском политехническом институте, исследовались упругие и демпфирующие характеристики шин легковых автомобилей на стенде рычажного типа (рисунок 1).

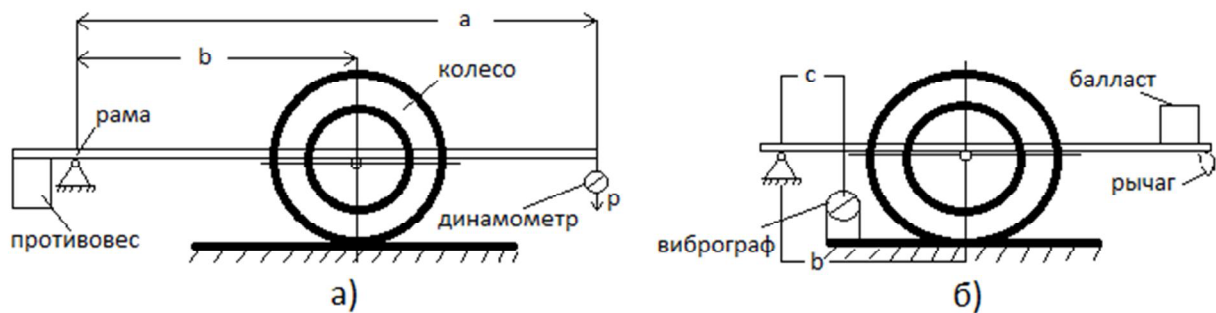


Рисунок 1 – Схемы стенда для исследований упругих и демпфирующих свойств шин: а) в режиме квазистатического нагружения; б) в режиме свободных колебаний [2]

Стенд для исследований упругих и демпфирующих свойств шин оснащен динамометрической площадкой, реохордным датчиком перемещений и светолучевым осциллографом Н-700. Шина исследовалась как в режиме квазистатического нагружения методом ступенчатого изменения радиальной нагрузки с последующим построением по точкам характеристик упругости, так и в режиме свободных колебаний масс стенда на испытуемой шине, как на упругом элементе, с одновременной записью затухающих колебаний оси колеса при помощи осциллографа.

В работе исследовались кривые затухающих колебаний масс стенда на испытуемой шине при изменении внутреннего давления воздуха, нагрузки и скорости радиальной деформации для шин 165-SR-13 Pirelli, 165-13 R ИЯ-170, 165-13 И-151.

Методика обработки кривых соответствовала методике, использованной в работе [3], т. е. предполагала вязкое трение в шине и ставила своей задачей определить коэффициенты сопротивления $k_{ш}$ и жесткости $c_{ш}$ шин по формулам:

$$k_{ш} = \frac{2 \cdot I \cdot \nu}{a^2 \cdot T}, \quad (1)$$

$$c_{ш} = \frac{I(2\pi^2 + \nu^2)}{a^2 \cdot T^2}, \quad (2)$$

где I – суммарный момент инерции колеса, грузов и балки стенда относительно оси качания;

ν – логарифмический декремент затухания;

a – расстояние от оси колеса до оси качания стенда;

T – период колебаний стенда.

Результаты обработки кривых затухающих колебаний приведены на рисунках 2 и 3.

Анализируя графики экспериментальных зависимостей, авторы делают следующие выводы: с увеличением частоты колебаний коэффициенты сопротивления шин уменьшаются, поэтому силы неупругого сопротивления, развиваемые шинами, остаются постоянными.

ными; зависимости коэффициентов жесткости от частоты колебаний имеют локальные максимумы в диапазоне $10\text{--}20\text{ с}^{-1}$, которые смещаются в сторону больших частот при увеличении давления воздуха в шинах; при увеличении внутреннего давления воздуха заметно снижаются коэффициенты аperiodичности и возрастают коэффициенты нормальной жесткости шин.

В работе [4], выполненной под руководством А.С. Литвинова, приведены результаты комплексных исследований большегрузных шин: 18.00-24 И-170, 320-508 ИНВ-12Б, 1500х600х635 В-77, в т. ч. упругих и демпфирующих их свойств при действии радиальной нагрузки. Схема стенда и методика обработки экспериментальных кривых затухающих колебаний аналогичны рассмотренным в предыдущей работе.

Результаты кривых затухающих колебаний дали аналогичные в качественном отношении закономерности изменения коэффициентов нормальной жесткости и неупругого сопротивления шин, что и в предыдущей работе, т. е. уменьшение коэффициентов сопротивления с увеличением частоты колебаний (рисунки 4 и 5).

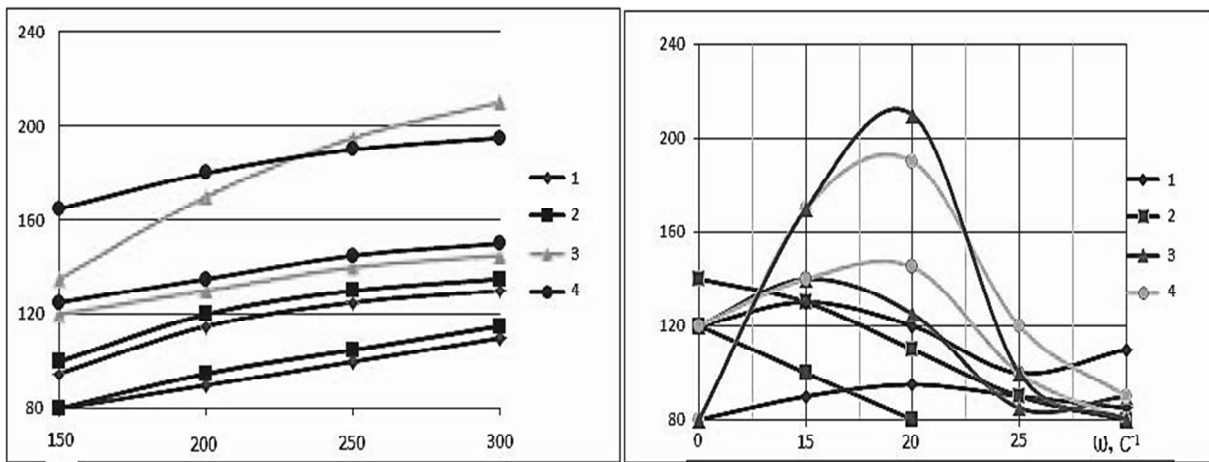


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента нормальной жесткости:
 а – от радиальной нагрузки на колесо; б – от частоты собственных колебаний стенда;
 1 – шина 165-SR-13; 2 – шина 165-13P; 3 – шина 165-13 (новая); 4 – шина 165-13 (износ 100%)

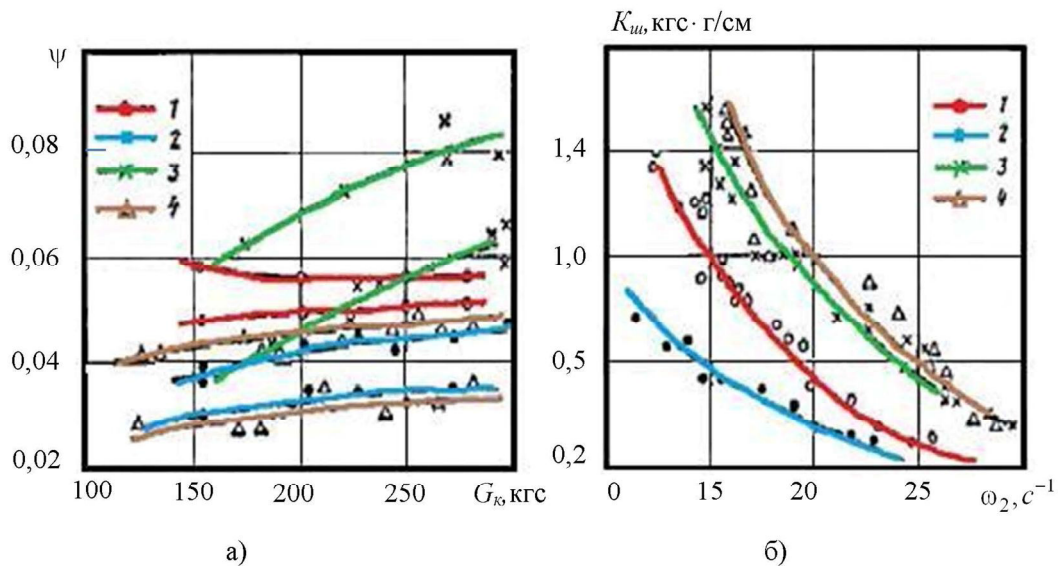


Рисунок 3 – Зависимости параметров демпфирования шин:
 а – коэффициента аperiodичности от радиальной нагрузки на колесо;
 б – коэффициента сопротивления от частоты собственных колебаний стенда
 (обозначения те же, что и на рисунке 2) [1]

Схожие закономерности изменения коэффициентов сопротивления и жесткости от частоты свободных колебаний при описании сил неупругого сопротивления в испытуемых шинах вязкой моделью трения были получены и в других исследованиях, например [5–9].

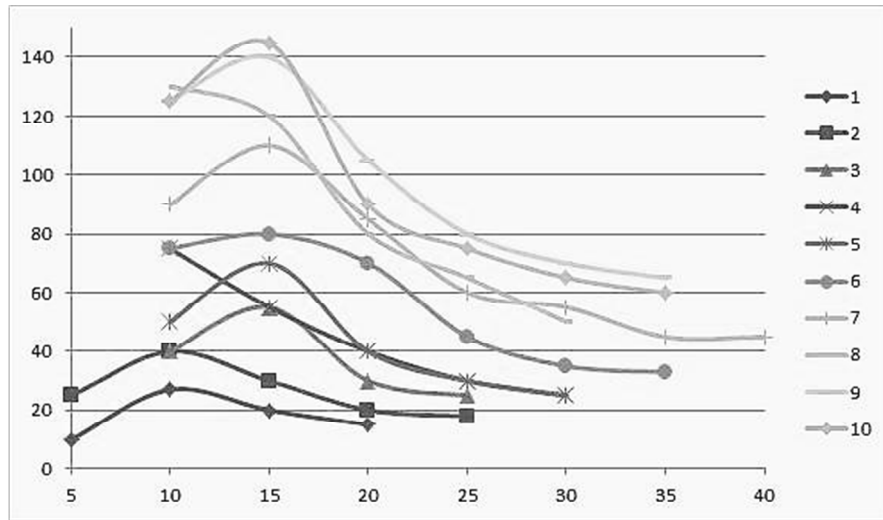


Рисунок 4 – Изменение динамической жесткости шин от частоты собственных колебаний стэнда при различных значениях внутреннего давления воздуха [4]

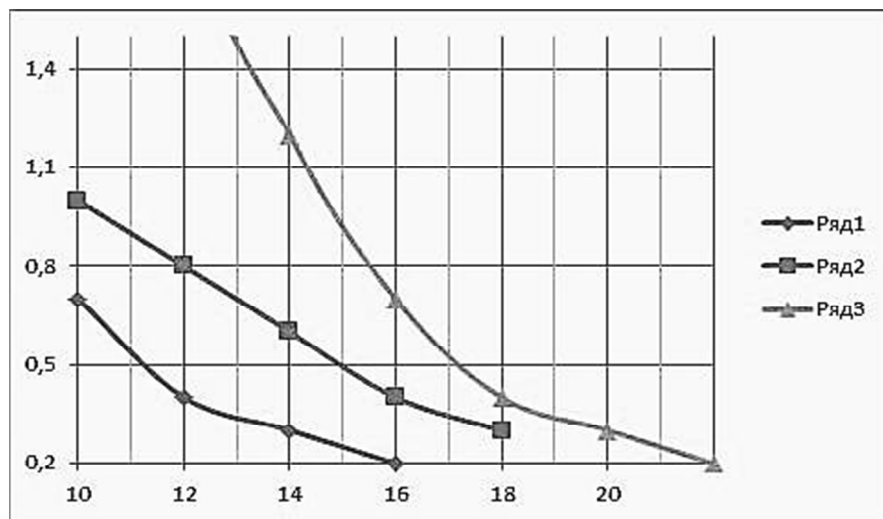


Рисунок 5 – Изменение коэффициента сопротивления шин от частоты собственных колебаний стэнда [4]

Ряд авторов в своих исследованиях пытались оценить поглощающую способность шины с использованием других методов и моделей, напрямую не связанных с моделью вязкого трения. В ряде публикаций делается попытка смоделировать поглощающие свойства пневматической шины при ее вертикальных колебаниях, исходя из основных аксиом реологии, полагающих, что всем телам присущи свойства фундаментальных тел: Гука, Ньютона и Сен-Венана, выраженные в разной степени [10]. Так в работе В.Н. Белковского [11] рассматривается обобщенная модель Кельвина–Фойгта, включающая параллельно соединенные упругий c_2 и вязкий k элементы, отражающие соответственно высокоэластичные и пластические свойства материалов шины, а также последовательно соединенный с ними упругий элемент c_1 , отражающий упругие свойства сжатого в шине воздуха. Сила сопротивления демпфированию шины, согласно данной трехэлементной модели при вынужденных гармонических колебаниях, равна:

$$P_{ш} = \frac{k_0 \cdot T}{1 + T^2 \cdot \omega^2} \cdot \dot{x} + \left(c + \frac{k_0 \cdot T^2 \cdot \omega^2}{1 + T^2 \cdot \omega^2} \right) \cdot x, \quad (3)$$

где ω – собственная частота колебаний колеса;
 c , k_0 , T – коэффициенты, определяемые по выражениям:

$$c = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2}; \quad (4)$$

$$k_0 = \frac{c_1^2}{c_1 + c_2}; \quad (5)$$

$$T = \frac{k}{c_1 + c_2}. \quad (6)$$

Несмотря на то, что закономерности изменения коэффициента сопротивления при диссипативной силе от частоты колебаний для трехэлементной модели (рисунок 6) более приближены к экспериментальным данным, приведенным в работе [3], использование этой модели при расчетах плавности хода и вибронегруженности автомобиля не менее затруднительно, чем при вязкоупругой модели Кельвина–Фойгта. Это связано, во-первых, со значительной трудоемкостью экспериментального определения параметров модели и, во-вторых, с определенной условностью разделения в модели влияния материалов шины и давления воздуха на значения ее параметров.

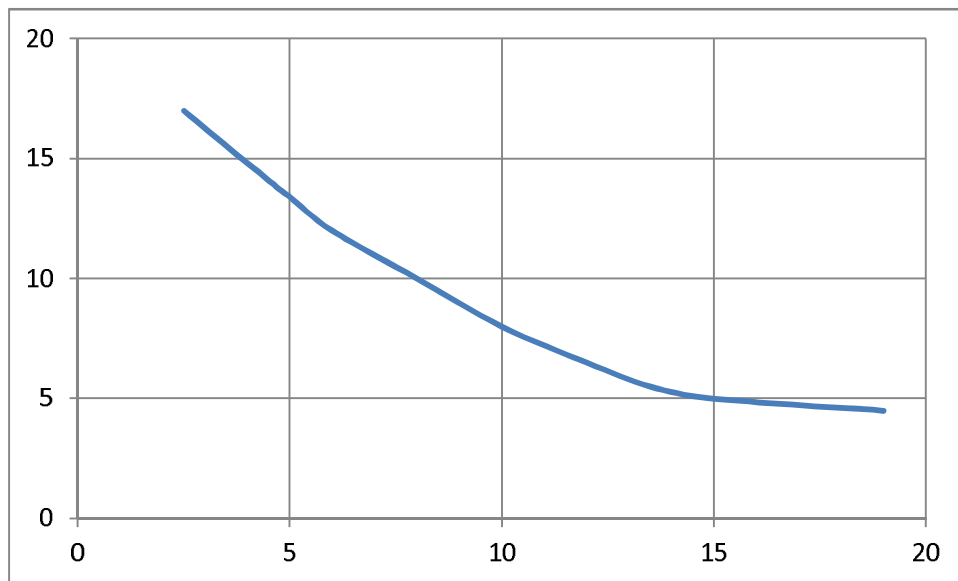


Рисунок 6 – Зависимость расчетного коэффициента трения в крупногабаритной шине от частоты колебаний колеса для трехэлементной модели [11]

Исследования упругих и демпфирующих свойств автомобильных шин представлены в книге Дж. Вонга [12]. Шина моделировалась упруго-вязкой моделью. Показатели жесткости и демпфирования для катящейся шины определялись методом сбрасывания. Результаты обработки кривых затухающих колебаний для транспортных внедорожных шин показали, что жесткость при колебаниях шины выше, чем жесткость при статическом обжатии и она возрастает как при росте нагрузки на шину, так и при внутреннем давлении воздуха в шине. Коэффициент демпфирования с ростом нагрузки на шину возрастает, а с ростом внутреннего давления в шине уменьшается. Показатели жесткости и демпфирования катящейся шины обычно определяются путем изменения реакции шины на известные гармони-

ческие возмущения. Реакции регистрируются на ступице колеса, а возмущения воздействуют на протектор шины.

В некоторых исследованиях [13] отмечается, что динамическая жесткость катящихся автомобильных шин может быть на 10–15 % процентов меньше, чем жесткость, полученная при статических испытаниях шин по характеристикам упругости.

Поэтому в работе [14] V.E. Gough высказал мнение, что приводимое в литературе различие между статической и динамической жесткостью вследствие преобладающего влияния динамики не представляет практического интереса. Оно может быть полезным при использовании линейного анализа для получения динамической жесткости шины, что особенно существенно для нелинейных систем.

Как отмечается в работе [12], демпфирование пневматической шины осуществляется главным образом вследствие гистерезиса ее материала и, в общем случае, имеет не только Кулоново демпфирование колебаний, но и вязкостное демпфирование, а также сочетание этих двух типов гашения колебаний. Эквивалентный коэффициент вязкостного демпфирования можно получить на основании динамических испытаний. Его значение меняется в зависимости от конструктивного исполнения шины, а также от условий эксплуатации (скорости качения колеса и частоты вертикальных колебаний). Как следует из работы [12], демпфирование в пневматических шинах значительно меньше, чем демпфирование в подвеске автомобиля.

Хорошо известно [15–17], что основные источники потерь энергии при механических колебаниях можно разделить на следующие три группы: рассеяние энергии в материале циклически деформируемого упругого элемента («пружины») за счет его несовершенной упругости (потери энергии в материале гистерезисного типа); рассеяние энергии на трение в узлах сочленений колебательной системы (конструкционное рассеяние энергии), и рассеяние энергии за счет потерь в окружающую среду как подвижную, так и неподвижную (аэрогидродинамические потери энергии). Известно также, что гистерезисные потери нелинейным образом зависят от амплитуды деформации материала и представляются в виде петель гистерезиса, образующихся при циклическом обжатии упругого элемента с данной амплитудой. При этом площадью петель гистерезиса в координатах «напряжение – деформация» будет характеризоваться величина рассеяния энергии, т. е. величина энергии, на которую за цикл колебаний будет уменьшаться энергия единичного циклически деформируемого объема «пружины» колебательной системы. Величину полной теряемой колебательной системой энергии за цикл легко получить путем интегрирования по всему объему циклически деформируемого материала «пружины», зная напряженное состояние последней. Однако, теоретическая разработка такого подхода с целью получения аналитического описания силы неупругого сопротивления, исходя из уравнений петли гистерезиса, сдерживалась нелинейностью выражения диссипативной силы, а, следовательно, трудностями выведения этой силы в дифференциальные уравнения движения механических систем и их решения.

В ряде исследований [15, 18] рассеивание энергии в материале при циклическом деформировании упругого элемента представлялось площадью петли гистерезиса. При этом для описания закона изменения силы неупругого сопротивления в деформируемом элементе петля гистерезиса аппроксимировалась уравнением эллипса. Функциональная зависимость такой закономерности имеет вид

$$F = \pm \beta \cdot \varepsilon_0^n \sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_0^2}}, \quad (7)$$

где ε , ε_0 – текущее и максимальные значения деформаций;

β , n – коэффициенты модели сопротивления, зависящие от свойств материала упругого элемента.

Таким образом, представилась новая возможность описать закономерности изменения силы неупругого сопротивления в пневматической шине, не ограничиваясь рамками физической природы поведения этой силы, а ориентируясь исключительно на одну из важнейших выходных характеристик – характеристику нормальной жесткости шины, которая в явном виде отражает наличие потерь в форме петли гистерезиса. Теперь задача разработки модели поглощающей способности шины будет состоять как в энергетическом, так и по внешнему виду математическом описании характеристики жесткости шины и, следовательно, силы неупругого сопротивления, которая не усложняла бы решение дифференциальных уравнений движения масс эквивалентных колебательных систем автомобиля.

Первые систематические исследования поглощающей способности автомобильных шин с позиции математического описания экспериментально полученных характеристик жесткости как петель гистерезиса были выполнены под руководством Н.Н. Яценко [19–20]. В этих исследованиях тщательно обоснованы предпосылки представления экспериментальной характеристики жесткости шины эллипсом с большим эксцентриситетом, а также взаимосвязь размахов силы неупругого сопротивления с радиальной деформацией шины. Также была разработана методика экспериментального определения параметров модели поглощающей способности пневматической шины, которая может носить название эллиптическо-степенная модель поглощающей способности пневматической шины.

Выводы

Обобщая результаты анализа литературных источников по теоретическим и экспериментальным исследованиям поглощающей способности пневматических шин, а также по моделированию сил неупругого сопротивления в материалах конструкций, можно сделать следующие выводы:

- в подавляющем большинстве исследований по плавности хода и вибронегруженности автомобиля оценка поглощающей способности пневматической шины осуществляется с использованием вязкой модели силы неупругого сопротивления, предполагающей линейную взаимосвязь этой силы со скоростью радиальной деформации шины;
- основным оценочным параметром вязкой модели является коэффициент неупругого сопротивления. Он существенно зависит от скорости радиальной деформации шины а также от параметров эксплуатационного состояния шины (особенно от внутреннего давления воздуха в шине) и особенностей ее конструкции. Это значительно усложняет экспериментальное определение коэффициента и его учет при расчетах колебаний автомобиля для различных режимов нагружения колеса;
- разрешение трудностей вязкой модели осуществляется за счет следующих упрощений и ограничений. Прежде всего, путем существенного упрощения эксперимента, поскольку испытания шин проводятся на стендах рычажного типа в режиме свободных затухающих колебаний с частотой 1–2 Гц для невращающегося колеса и при номинальных значениях параметров эксплуатационного состояния шины. Также упрощения методики учета приведенного коэффициента при расчетах колебаний автомобиля, поскольку коэффициент принимается постоянным, независящим от скорости радиальной деформации шины и других указанных факторов. Безусловно, это приводит к искусственному искажению расчетного демпфирования в шине при средних и больших частотах воздействия неровностей дороги;
- моделями для описания силы неупругого сопротивления в шине с учетом зависимости силы сопротивления от скорости радиальной деформации могут быть комплексные модели, учитывающие вязкое и сухое трения. Модели строятся на основе априорного признания какой-либо гипотезы о физической природе сил трения, что сильно ограничивает применение разработанных моделей в силу условности разделения трения в шине на вязкое и сухое;
- наиболее общее представление о поглощающей (демпфирующей) способности материала любой конструкции вне зависимости от физической природы сил трения дает пет-

ля гистерезиса. Аналитическое описание петли гистерезиса позволяет разработать для пневматической шины модель неупругого сопротивления, свободную от вязкой модели и в явном виде отражающую поглощенную и рассеянную энергию вертикальных колебаний.

Список литературы

1. Ломакин В.В. Исследование упругих и демпфирующих характеристик шин легковых автомобилей на стенде / В.В. Ломакин, Л.А. Черепанов, В.Н. Вермеюк // Автомобильная промышленность. – 1976. – № 8. – С. 25–26.
2. Колесников К.С. Определение внутренних потерь в автомобильной шине / К.С. Колесников // Автомобильная и тракторная промышленность. – 1952. – № 9. – С. 11–13.
3. Колесников К.С. Автоколебания управляемых колес автомобиля / К.С. Колесников. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 238 с.
4. Литвинов А.С. Результаты комплексных исследований большегрузных шин / А.С. Литвинов, А.М. Петренко, М.М. Гуров, Г.Н. Коптелов // Труды МАДИ. Вып. 145. – М.: МАДИ, 1977. – С. 69–76.
5. Морозов Б.И. О характере трения в материале пневматической шины / Б.И. Морозов // Труды МАДИ. Вып. 2 – М.: МАДИ, 1969. – С. 52–56.
6. Силуков Ю.Д. Аналитическое определение сил неупругого сопротивления и потерь энергии при колебаниях пневматического колеса / Ю.Д. Силуков // Известия вузов: Машиностроение. – 1973. – № 8. – С. 88–94.
7. Чабуткин Е.К. Исследование динамики шин самоходных катков: автореф. дисс. на соиск. учен. степени. канд. техн. наук / Е.К. Чабуткин. – Л.: ЛПИ, 1978. – 29 с.
8. Цимбалин В.Б. Исследование динамических характеристик шин, влияющих на колебания автомобиля / В.Б. Цимбалин // Труды ГПТИ. Т. 27. – Горький: изд-во ГПТИ, 1971. – Вып. 6. С. 21–24.
9. Overton J.A. The vertical Response characteristics of the non-rolling tyre / J.A. Overton, B. Mills, C. Ashley // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1969–1970. – V. 184 / P. 2A. – N 2. – P. 325–347.
10. Водяник И.И. Выбор моделей для аналитического описания взаимодействия пневматической шины с дорогой / И.И. Водяник // Автомобильная промышленность. – 1980. – № 10. – С. 18–19.
11. Белковский В.Н. Динамическая нагруженность шин сельскохозяйственных тракторов и тракторных прицепов и пути повышения их долговечности: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук / В.Н. Белковский. – Минск.: БПИ, 1983. – 28 с.
12. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
13. Moore D.F. The friction of pneumatic tires / D.F. Moore. – Oxford. – N.U., 1975. – 220 p.
14. Gough V.E. Tyres and Air Suspension. Advances in Automobile Engineering / V.E. Gough // Symposium on Vehicle Ride Problem. — Oxford., England: Pergamon Press, 1963.
15. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я.Г. Пановко. – М.: Физматгиз, 1960. – 195 с.
16. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях / Г.С. Писаренко. – К.: изд. АН УССР, 1962. – 436 с.
17. Писаренко Г.С. Колебания кинематически возбуждаемых механических систем с учетом диссипации энергии / Г.С. Писаренко, О.Е. Богинич. – К.: Наукова думка, 1981. – 218 с.
18. Давыденков Н.Н. О рассеянии энергии при вибрациях / Н.Н. Давыденков // Журнал технической физики. – 1938. – Т. VIII. – № 6. – С. 156 – 161.
19. Рыков С.П. Некоторые результаты экспериментальных исследований поглощающей способности ряда шин легковых автомобилей / С.П. Рыков, П.И. Степанов, Н.Н. Яценко // I Всесоюзное научно-техническое совещание «Динамика и прочность автомобиля»: тезисы докл. – М., 1984. – С. 93–94.
20. Яценко Н.Н. Колебания подвески с учетом поглощающей способности шин / Н.Н. Яценко, Г.Н. Капанадзе, С.П. Рыков // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 6. – С. 15–18.

Рецензент: к.т.е., доц. Н.А. Мастепан, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

Стаття надійшла до редакції 19.07.12

© Соколовский С.А., Коханенко В.Б., Яковлев А.Н., 2012