

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА С НЕРОВНОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Н.С. Вольская, Я.Ю. Левенков, О.А. Русанов

Методом конечных элементов в физически и геометрически нелинейной постановке исследовано взаимодействие автомобильного колеса, оснащенного пневматической бескамерной шиной с опорной поверхностью, имеющей неровности различной формы. В расчетах учтены конструктивные особенности и механические свойства автомобильной шины, форма и механические характеристики опорной поверхности, характер взаимодействия шины с опорной поверхностью, имеющей неровности. Адекватность разработанных моделей шины подтверждена экспериментально. Полученные результаты предназначены для уточненного моделирования колесного движителя и учета сглаживающей способности автомобильных шин в исследованиях проходимости и колебаний автомобиля при движении по дорогам различного типа и бездорожью.

Ключевые слова: автомобильная пневматическая шина, сглаживающая способность автомобильного колеса, подрессоривание автомобиля, метод конечных элементов.

Введение

Одним из направлений совершенствования эксплуатационных показателей колесных машин является повышение плавности хода и снижение динамических нагрузок на их конструкцию от воздействия неровностей дороги [1, 2]. Улучшение характеристик подрессоривания способствует существенному повышению управляемости, устойчивости и безопасности движения автомобиля, увеличению ресурса его деталей. Разработка новых более эффективных систем подрессоривания является актуальной задачей, решение которой в настоящее время невозможно представить без применения современных методов моделирования различных узлов и составных частей ходовой системы автомобиля.

В большинстве теоретических исследований колебаний автомобиля колесо с пневматической шиной отражено в динамических моделях с помощью сосредоточенной массы, взаимодействующей с поверхностью дороги через упругий элемент (пружину) с контактом в одной точке и при движении автомобиля точно повторяющей траекторию, определяемую профилем пути [1–3].

В реальных условиях процесс контакта шины

с неровной опорной поверхностью более сложный. В зоне взаимодействия колеса и дороги образуется пятно контакта, в пределах которого распределение контактного давления неравномерно. Большой интерес представляет изучение такого взаимодействия с определением размеров пятна контакта, величины деформаций шины и, если опорная поверхность не является жесткой, деформаций самой поверхности, включая неровности различного типа.

Экспериментальные методы исследования данной проблемы являются трудоемкими и дорогостоящими и требуют значительных материальных затрат на оборудование, инструментарий, образцы для испытаний. Кроме того, они имеют существенные ограничения по диапазонам варьирования параметров шины и грунта.

Более перспективными являются универсальные численные методы (в сочетании с экспериментально подтвержденными расчетными моделями), позволяющие имитировать сложные процессы статического и динамического взаимодействия шины с опорной поверхностью. Развитие вычислительных средств позволяет получать решение в подобных задачах.

Одной из современных математических моделей описания движения автомобиля по неровной опорной поверхности является модель постоянного сглаживания [4], которая достаточно точно описывает взаимодействие автомобильной шины с твердой неровной поверхностью, учитывая происходящее при движении колесной машины изменение пятна контакта шины с поверхностью дороги. Данная модель основана на следующих положениях:

1) пневматическая шина представлена в виде тонкой, идеально эластичной оболочки, которая плотно облегает все неровности в пятне контакта;

2) длина пятна контакта шины непрерывно изменяется при движении автомобиля по неровностям и определяется параметрами колебательной системы автомобиля;

3) ширина пятна контакта принимается постоянной и равной ширине протектора шины;

4) пневматическая шина обладает свойствами сосредоточенной массы с радиально расположенными упругими и демпфирующими связями.

Модель постоянного сглаживания позволила уточнить теоретические расчеты автомобиля, приблизить их к результатам натурных испытаний. Однако эта модель не позволила в полной мере отразить некоторые существенные особенности процесса формообразования пятна контакта шины с опорной поверхностью и учесть с достаточной точностью неровности дороги определенных видов.

Цель данной работы – исследование взаимодействия автомобильного колеса и неровной опорной поверхности для уточнения применяющихся на практике способов оценки плавности хода колесных машин. Эти способы в более общей постановке позволят учесть сглаживающие эффекты шины при движении автомобиля по ровным и неровным (с неровностями раз-

личной формы и размеров) дорогам с твердой и деформируемой поверхностью.

Перед проведением указанных исследований были отработаны принципы конечно-элементного моделирования нелинейных динамических процессов взаимодействия колеса (с пневматической шиной) с неровной опорной поверхностью. Принципы моделирования имеют достаточно общий характер и могут быть применены к широкому классу объектов при решении задач данного типа.

Сглаживающая способность эластичной шины автомобильного колеса

Колеса автомобиля, оснащенные пневматическими шинами, непосредственно контактируют с поверхностью дороги, осуществляя первичное сглаживание возмущающего воздействия неровностей пути на кузов. Взаимодействие колеса с опорной поверхностью является сложным процессом, обусловленным как особенностями конструкции самой шины, так и характеристиками дорожной поверхности [5].

Рассмотрим процесс переезда автомобильным колесом неровности длиной s и высотой q (рис. 1, а) при движении автомобиля со скоростью v_a .

Схема движения абсолютно жесткого колеса по твердой поверхности с неровностью данной формы показана на рис. 1, б, эластичного колеса – на рис. 1, в. Для абсолютно жесткого колеса вертикальное перемещение оси колеса h равно высоте неровности q , а для эластичного колеса вертикальное перемещение оси колеса h меньше, чем высота неровности q , и траектория движения оси колеса более пологая (сглаженная) вследствие деформирования шины. Этот эффект известен как эффект сглаживания эластичного колеса, а свойство пневматической шины снижать воздействие неровностей на

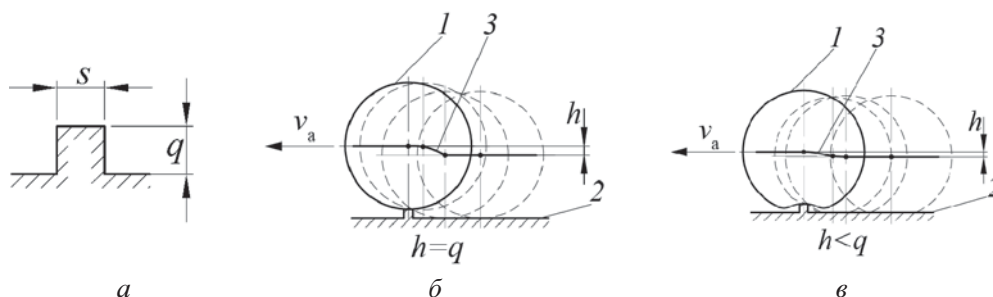


Рис. 1. Влияние эластичности шины на перемещение центра масс колеса:
1 – колесо; 2 – опорная поверхность; 3 – траектория движения оси колеса

кузов при движении – как сглаживающая способность шины.

На характер сглаживания неровностей дороги влияют размеры шины (диаметр D , ширина профиля B , высота профиля H (рис. 2, а) и другие геометрические параметры), характеристики материалов шины, давление воздуха в шине p_w и нагрузка P_z , приходящаяся на колесо.

Кроме того, на характер сглаживания также влияют параметры поверхности дороги (геометрия неровностей, механические характеристики грунта). При нагружении колеса изменяется вертикальная координата его оси относительно опорной поверхности и, соответственно, статический радиус колеса, что влияет не только на характер сглаживания, но и на нагрузки в трансмиссии, если колесо является ведущим. Вертикальное смещение оси колеса обозначим как h_z и будем называть его прогибом. Схемы взаимодействия колеса с поверхностями дороги различного типа показаны на рис. 2, б, в, где $r_{ст1}$, $r_{ст2}$ – статические радиусы колес при взаимодействии с ровной и неровной опорными поверхностями.

До настоящего времени сглаживающая способность пневматических шин в расчетах колебаний автомобиля при движении по неровным поверхностям дороги учитывали весьма упро-

щенно. Наибольшую сложность при исследовании колебаний автомобиля в процессе движения представляло моделирование колесного движителя и определение его характеристик.

Разработка уточненной модели взаимодействия автомобильного колеса с опорной поверхностью

В качестве объекта исследования, на котором отработаны принципы моделирования взаимодействия автомобильного колеса с опорной поверхностью, выбрана шина 175/80 R16, основные конструктивные элементы которой показаны на рис. 3.

Моделирование шины осуществлялось методом конечных элементов (МКЭ) в физически и геометрически нелинейной постановке с учетом контактного взаимодействия шины с опорной поверхностью. Создана конечно-элементная модель шины с достаточно подробным отображением особенностей конструкции и геометрии, физико-механических свойств шины и грунта, различных факторов нагружения, определяющих взаимодействие шины с поверхностью грунта.

Расчеты выполнены с помощью программы нелинейного динамического анализа LS-Dyna 971 [6], в которой реализован явный метод интегрирования по времени уравнений динамиче-

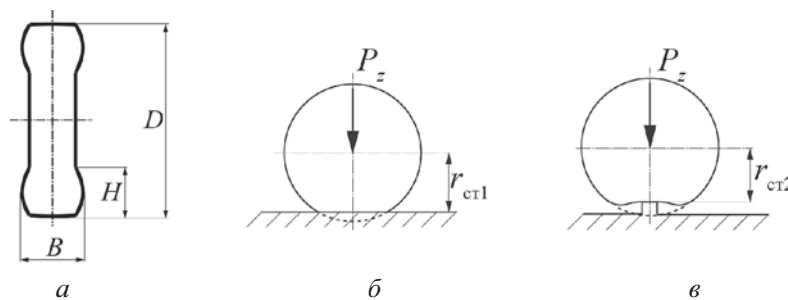


Рис. 2. Форма профиля автомобильной шины (а) и схемы ее взаимодействия с ровной (б) и неровной (в) опорными поверхностями

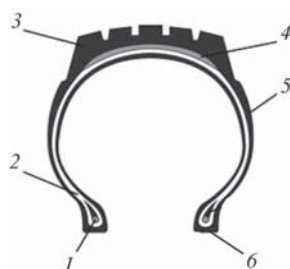


Рис. 3. Основные конструктивные элементы шины:

1 – наполнительный шнур с бортовой проволокой; 2 – каркас; 3 – протектор; 4 – брекер; 5 – боковина; 6 – борт

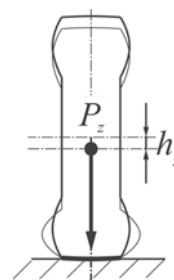


Рис. 4. Расчетная схема тестовой задачи

ского равновесия системы.

При разработке расчетной модели приняты следующие допущения:

1. Для отображения корда, опоясывающего кольца и бортовой проволоки использованы стержневые конечные элементы (материал – сталь), которые допускают только растяжение и не воспринимают изгиб и кручение. Применение стержневых элементов упрощает разработку модели.

2. Составляющая конструкции шины, выполненная из резины, смоделирована объемными конечными элементами, свойства которых представлены моделью гиперупругого материала Муни-Ривлина [7], позволяющего учесть несжимаемость резины и ее большие деформации.

Расчетная модель взаимодействия шины с неровной опорной поверхностью учитывает влияние переменного внутреннего давления воздуха в шине p_w , позволяет варьировать нормальную (к опорной поверхности) нагрузку P_z на колесо, имитировать различные по форме микропрофили опорной поверхности.

Чтобы подтвердить адекватность модели и принятую расчетную схему, первоначально в квазистатической постановке решен ряд контактных задач взаимодействия шины с твердой ровной и горизонтальной опорной поверхностью и определен вертикальный прогиб шины h_z в зависимости от нормальной нагрузки P_z на колесо (рис. 4) при различных значениях внутреннего давления воздуха в шине p_w .

Диапазон нагрузки P_z составлял от 1500 до 3500 Н при шаге изменения 500 Н, диапазон внутреннего давления воздуха в шине p_w – от 0,1 до 0,2 МПа при шаге его изменения 0,05 МПа.

В данной задаче использованы условия симметрии. Смоделирована четвертая часть шины с введением соответствующих закреплений. Конечно-элементная модель в препроцессоре

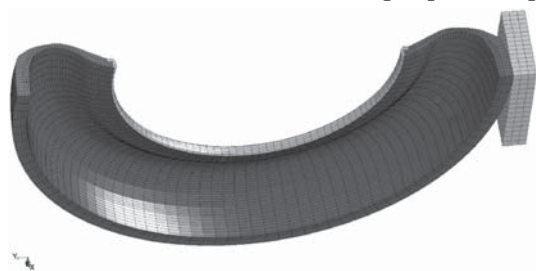


Рис. 5. Конечно-элементная модель для расчета взаимодействия автомобильной шины с опорной поверхностью

LS-Dyna показана на рис. 5.

Результаты расчетного моделирования приведены на рис. 6. Показано взаимное положение шины и опорного основания до приложения вертикальной нагрузки и после него. Хорошо заметно образование контактной зоны между шиной и опорной поверхностью, а также изменение формы автомобильной шины.

Результаты расчетов по МКЭ сопоставлены с результатами испытаний шины на стенде, а также с аналитическими значениями прогиба h_z шины, полученными по эмпирической формуле [8]:

$$h_z = \frac{P_z}{\pi K (p_w + p_0) \sqrt{DB}}, \quad (1)$$

где p_0 – давление в шине (определяется экспериментально, в данном случае $p_0 = 0,008$ МПа), создаваемое конструкцией каркаса (кордом, опоясывающим кольцом и др.); K – коэффициент, учитывающий конструкционные особенности шины (диагональная или радиальная шина, количество слоев наполнителя, конструктивные особенности протектора, материал армирующих элементов и т.д.).

Коэффициент K определяется экспериментально для конкретного типа шин. Формула (1) широко применяется в инженерных расчетах для определения характеристик взаимодействия шины с ровной поверхностью дороги.

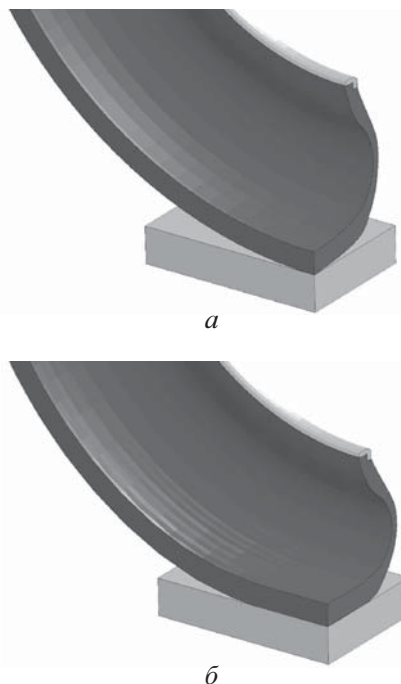


Рис. 6. Взаимное положение шины и опорного основания до приложения вертикальной нагрузки (а) и после него (б)

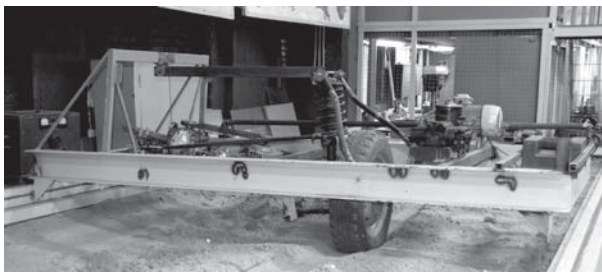


Рис. 7. Стенд для экспериментальных исследований взаимодействия автомобильных колес с грунтовой поверхностью

Данная формула подтверждается результатами испытаний.

Для экспериментальной проверки адекватности расчетной модели шины проведены испытания шины на стенде «Грунтовой канал», созданном учеными и молодыми специалистами кафедры «Автомобили и двигатели» ФГБОУ ВПО «МГИУ» (рис. 7). На стенде возможны испытания шин как на твердой поверхности, так и на деформируемой грунтовой поверхности с различными свойствами.

Методика выполненного в рамках данной работы эксперимента предусматривает установку колеса (модуль «активное управляемое колесо») на ровную твердую поверхность и последующее его нагружение с помощью набора мерных грузов массой, кратной 50 кг. Установлены начальное внутреннее давление воздуха в шине $p_w = 0,2$ МПа и начальная нагрузка на колесо $P_z = 1500$ Н. Последовательно для различных уровней нагрузки и давления в шине проведены измерения прогиба шины h_z .

Результаты расчетов и экспериментов наглядно показывают, что в сравниваемых случаях значения прогибов шины, полученные расчетными и экспериментальными методами, достаточно близки (рис. 8). Расхождение значений для рассматриваемых примеров не превышает 10 %, что подтверждает адекватность выбранных расчетных моделей и разработанных принципов моделирования, которые могут быть использованы для исследования более сложных форм взаимодействия шины с грунтовой поверхностью.

Влияние формы неровности опорной поверхности на деформацию шины

Следующим этапом исследования стало применение разработанной модели для определения влияния формы неровности опорной поверхно-

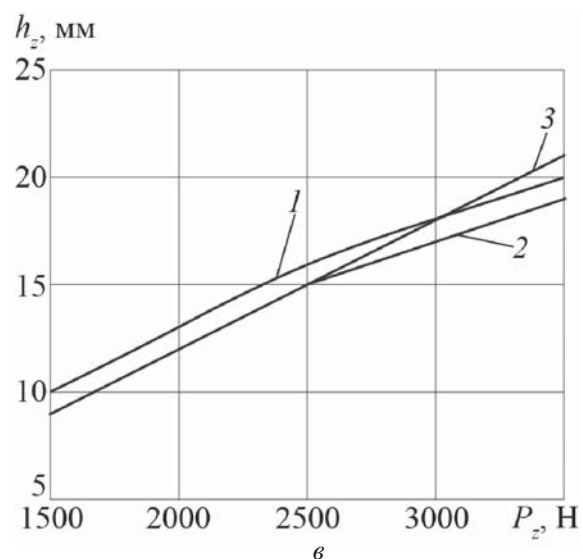
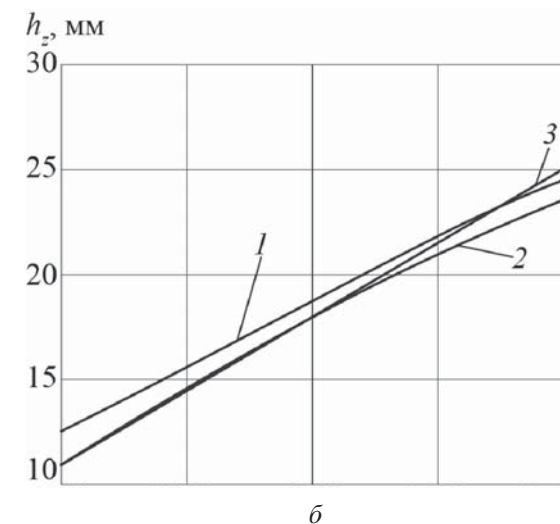
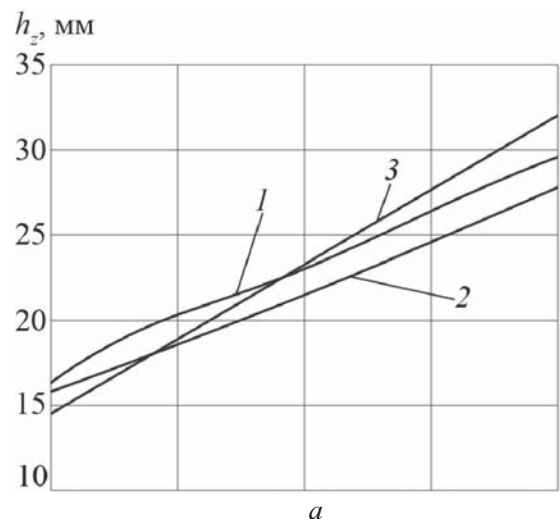


Рис. 8. Зависимость прогиба шины h_z от нормальной нагрузки P_z на колесо при давлении воздуха в шине 0,1 МПа (а), 0,15 МПа (б), 0,2 МПа (в):

1 – эксперимент; 2 – расчет по формуле (1); 3 – расчет МКЭ

сти на деформацию шины, так как известные методы расчета взаимодействия шины с опорной поверхностью не позволяют аналитически определить влияние формы неровности поверхности в пятне контакта на сглаживающую способность шины. Ранее получение таких оценок было возможно только экспериментальным путем.

Рассмотрим неровности прямоугольной и цилиндрической формы, имеющие одинаковую длину $s = 40$ мм и высоту $q = 20$ мм (рис. 9). Ширина неровностей примерно равна ширине профиля шины.

Нагрузка на колесо P_z в обоих вариантах принята постоянной и равна 3500 Н. Расчеты выполнены при $p_w = 0,1; 0,15; 0,2$ МПа. Для указанных параметров нагружения определен прогиб шины h_z . На рис. 10 представлена зависимость прогиба шины h_z от внутреннего давления p_w и формы неровности.

Из рис. 10 видно, что поверхность шины лучше охватывает цилиндрическую неровность, чем прямоугольную, о чем свидетельствуют большие значения статического прогиба h_z для всех значений давления в шине из исследуемо-

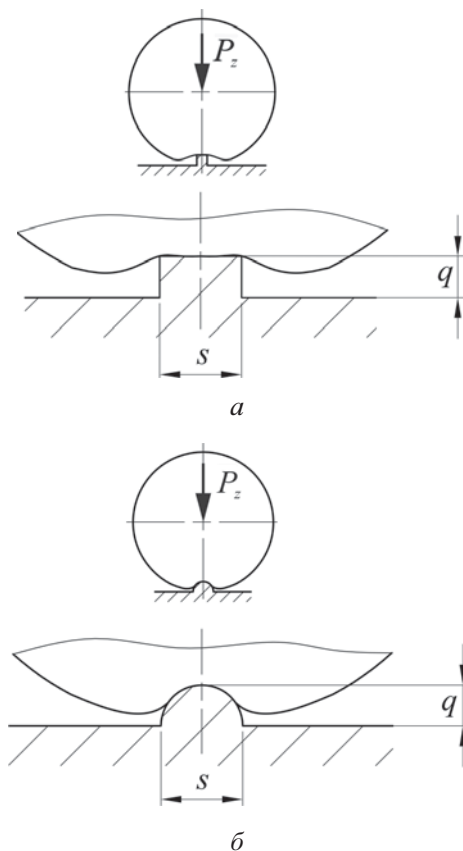


Рис. 9. Неровности опорной поверхности, имеющие прямоугольную (а) и цилиндрическую (б) формы

го диапазона. Колесо при движении автомобиля соответственно в меньшей степени будет реагировать на такую неровность. Следует отметить, что отсчет статического прогиба шины производили от верхней точки неровности.

Дополнительно оценено в зависимости от давления в шине p_w изменение соотношения статических радиусов шины $r_{ст2}/r_{ст1}$. При определении статического радиуса $r_{ст2}$ использованы неровности сначала прямоугольной, а затем цилиндрической формы. Результаты расчетов представлены на рис. 11.

Выполненные расчеты показывают, что при низких давлениях воздуха в шине p_w форма

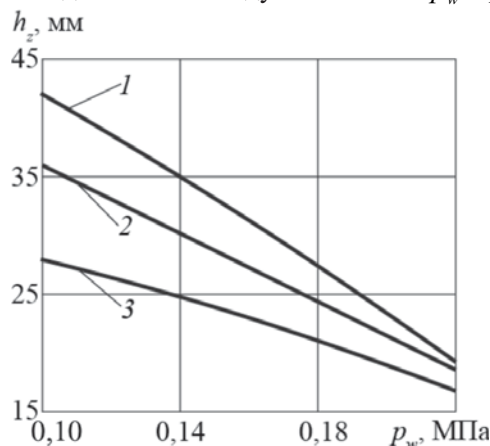


Рис. 10. Зависимость статического прогиба шины h_z от давления в шине p_w и формы неровности:

1 – цилиндрическая; 2 – прямоугольная;
3 – ровная поверхность

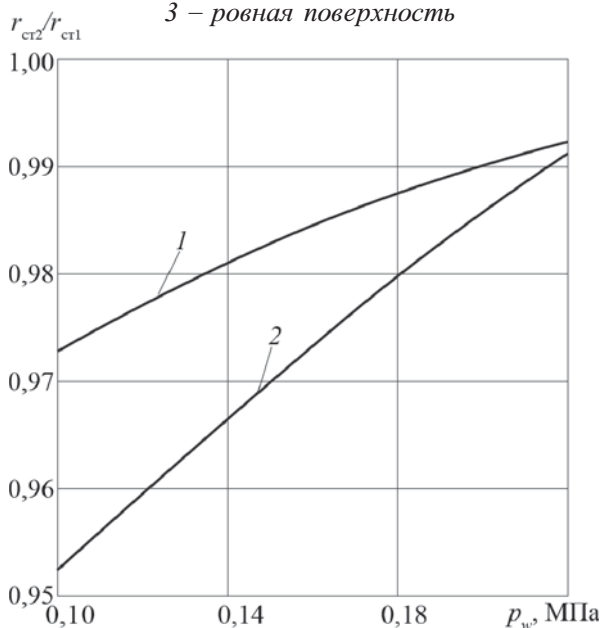


Рис. 11. Зависимость соотношения статических радиусов шины $r_{ст2}/r_{ст1}$ от давления в шине p_w и формы неровности:

1 – прямоугольная; 2 – цилиндрическая

неровности оказывает влияние на статические прогибы шины.

Заключение

Разработаны способы моделирования и расчетные модели взаимодействия колеса (с пневматической шиной) с неровной опорной поверхностью, адекватность которых подтверждена экспериментальными исследованиями и сравнением с аналитическим расчетом по известным и проверенным (в специальных расчетных случаях) эмпирическим формулам.

Созданные расчетные модели взаимодействия колеса с неровной опорной поверхностью позволяют с достаточной для практических целей точностью оценить влияние параметров шины на формообразование пятна контакта и сглаживающую способность шины.

Расчетные исследования взаимодействия колеса с неровной опорной поверхностью позволили выявить влияние формы неровности на сглаживающую способность шины (наряду с внутренним давлением воздуха в шине, нормальной нагрузкой на колесо, длиной и высотой неровностей).

Список литературы

1. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Теория автомобиля: учебное пособие. М.: МГИУ, 2008. – 318 с.
2. Агейкин Я.С., Вольская Н.С., Чичекин И.В. Проходимость автомобиля: учебник. М.: МГИУ, 2010. – 275 с.
3. Яценко Н.Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин. М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.
4. Рыков С.П. Методы моделирования и оценки поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин в расчетах подвески и колебаний колесных машин: Дис. ... д-ра. техн. наук. Братск: БрГТУ, 2005. – 430 с.
5. Труды научно-исследовательского института шинной промышленности: сб. 3: Методы расчета и испытания автомобильных шин / под ред. В.Ф. Евстратова, С.Л. Левина, Ф.И. Ящунской. М.: Госхимиздат, 1957. – 196 с.
6. ANSYS Academic Research LS-Dyna. Customers № 656805 (Moscow State Industrial University)
7. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. – 940 с.
8. Бидерман В.Л., Гуслицер Р.Л. Автомобильные шины. М.: Госхимиздат, 1963. – 384 с.

Материал поступил в редакцию 10.01.2011

ВОЛЬСКАЯ

**Наталья
Станиславовна**

E-mail: volskaja@mail.msiu.ru
Тел. +7 (495) 675-62-42

Доктор технических наук, профессор. Заведующая кафедрой автомобилей и двигателей ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – определение опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям. Автор около 40 научных работ.

ЛЕВЕНКОВ

**Ярослав
Юрьевич**

E-mail: lique87@mail.ru
Тел.: +7 (495) 355-76-16

Ассистент ФГБОУ ВПО «МГИУ» кафедры автомобилей и двигателей. Сфера научных интересов – создание математических моделей взаимодействия колесного движителя с опорной поверхностью для анализа параметров взаимодействия. Автор шести научных работ.

РУСАНОВ

**Олег
Александрович**

E-mail: newmalina@rambler.ru
Тел. +7 (495) 620-39-89

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НИО, доцент кафедры сопротивления материалов ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – численные методы статического и динамического анализа машиностроительных конструкций, расчеты на прочность несущих систем машин. Автор более 60 научных работ.