

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.3.027.52:531

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ШИНЫ ПРИ ЕЕ СТАЦИОНАРНОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ КАЧЕНИИ ПО ДОРОГЕ

А.А. Ларин, доцент, к.т.н., Национальный технический университет «ХПИ»,  
Ю.В. Арефин, преподаватель, Донецкий индустриальный техникум

*Аннотация.* Предложена плоская эквивалентная модель пневматической шины, которая геометрически учитывает основные конструктивные элементы автомобильного колеса. Приведен анализ расчетов деформирования плоской модели пневматической шины при ее стационарном качении по твердой поверхности. Определены закономерности формирования динамического радиуса шины и момента сопротивления качению.

*Ключевые слова:* пневматическая шина, стационарное качение, динамический радиус, сопротивление качению.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ШИНИ ПРИ ЇЇ СТАЦІОНАРНОМУ ПРЯМОЛІНІЙНОМУ КОЧЕННІ ПО ДОРОЗІ

О.О. Ларін, доцент, к.т.н., Національний технічний університет «ХПІ»,  
Ю.В. Арефін, викладач, Донецький індустріальний технікум

*Анотація.* Запропоновано плоску еквівалентну модель пневматичної шини, що геометрично враховує основні конструктивні елементи автомобільного колеса. Наведено аналіз розрахунків деформування плоскої моделі пневматичної шини під час її стаціонарного кочення по твердій поверхні. Визначено закономірності формування динамічного радіуса шини та моменту опору коченню.

*Ключові слова:* пневматична шина, стаціонарне кочення, динамічний радіус, опір коченню.

## INVESTIGATION OF TYRE DEFORMATION AS ITS STRAIGHT STATIONARY ROLLING ON THE ROAD

O. Larin, Associate Professor, Candidate of Technical Science,  
National Technical University «KhPI»,  
Yu. Arefin, lecturer, Donetsk Industrial Technical Secondary School

*Abstract.* The paper deals with development of the equivalent plane model of the tyre which geometrically takes into account the basic design elements of the vehicle wheel. The analysis of deformation of the model of pneumatic tyre in its steady rolling on rigid surface is presented. The laws of formation of the dynamic tyre radius and rolling resistance has been investigated.

*Key words:* pneumatic tyre, steady rolling, dynamic tyre radius, rolling resistance.

## Введение

Нормальная работа пневматических шин сопряжена с их качением по дороге. В этой связи характеристики и особенности катящейся ши-

ны представляют наибольший интерес, так как непосредственно влияют и/или формируют технические характеристики транспортного средства, на котором они установлены.

Исследование стационарного качения пневматических шин позволяет определить один из важнейших параметров пневматических шин – их сопротивление качению, которое определяет влияние шины на топливную экономичность автомобиля. В легковых автомобилях потери в шинах при движении в среднем достигают 7 %, а для грузовых автомобилей этот показатель еще существеннее [1].

### Анализ публикаций

Сопротивление качению шин – это комплексная характеристика [1–3], в которую входят потери в результате трения шин о дорогу, преодоление сопротивления воздуха, гистерезисные потери в материалах при деформировании шины, а также возникновение момента сил, препятствующего движению. При стационарном качении на относительно небольших скоростях сопротивление воздуха и сопротивление, вызванное силами трения в контакте с проскальзыванием, пренебрежимо мало по сравнению с остальными факторами [1].

Существующие методики исследования сопротивления качению являются экспериментальными. Это методики, проводимые в лабораторных условиях на испытательных стендах [3], и дорожные испытания [1, 3, 4]. Следует отметить, что экспериментальные подходы не дают возможности выделить отдельно факторы, формирующие момент сопротивления качению, так как дают сразу комплексный результат.

### Цель и постановка задачи

В данной работе рассмотрены вопросы формирования механического момента сил сопротивления качению, который формируется в результате потери симметрии деформации в процессе качения колеса. В работе вводится гипотеза о том, что данная асимметрия вызвана продольным деформированием структурных элементов шины (боковина, брекер, каркас и протектор), которое является следствием воздействия на шину инерционных сил.

### Построение математической модели объекта

В современной литературе представлено огромное разнообразие математических моделей пневматических шин [3–5]. Наиболее

полные из них – это трехмерные конечно-элементные модели, которые учитывают большие деформации, вязко-упругие свойства резиноподобных материалов, многослойную структуру и ортотропию механических свойств. Вместе с тем детальное теоретическое моделирование стационарного качения пневматической шины на основе таких моделей сопряжено с большими вычислительными и алгоритмическими трудностями.

В этой связи в работе предлагается построить упрощенную плоскую модель пневматического колеса. При этом сохраняются основные геометрические и структурные особенности (многослойность) конструкции, а механические свойства плоских слоев подбираются так, чтобы сохранить соответствие статической деформации шины, находящейся в контакте с дорогой, и особенности деформации шины в поле центробежных сил, полученные авторами на основе более полных моделей ранее в работах [5–7].

Построенная на основе этих критериев эквивалентности плоская конечно-элементная модель шины приведена на рис. 1. В модели присутствуют плоские эквивалентные слои боковины, брекерного кольца и протектора, а также элементы, отражающие жесткий диск и твердую дорожную поверхность.

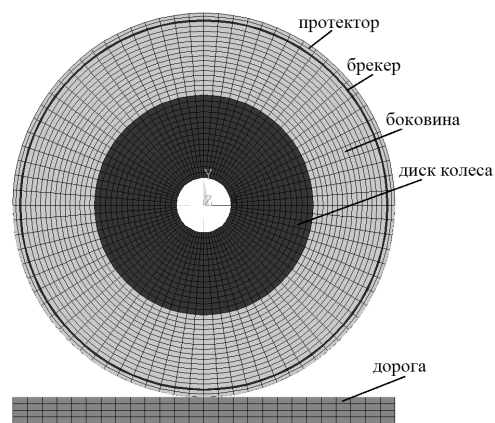


Рис. 1. Плоская эквивалентная модель колеса автомобиля

На основе этой модели была проведена серия расчетов статического обжатия шины о твердое дорожное плотное. При этом были получены поля перемещений (рис. 2) для шины, нагруженной номинальной осевой нагрузкой ( $F=3000$  Н), а также эпюры контактного давления (рис. 3).

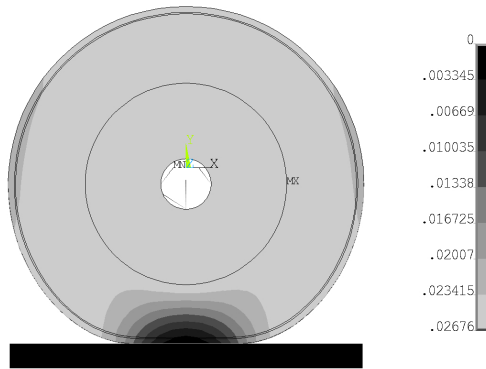


Рис. 2. Контактное взаимодействие шины с дорогой в результате осевой нагрузки

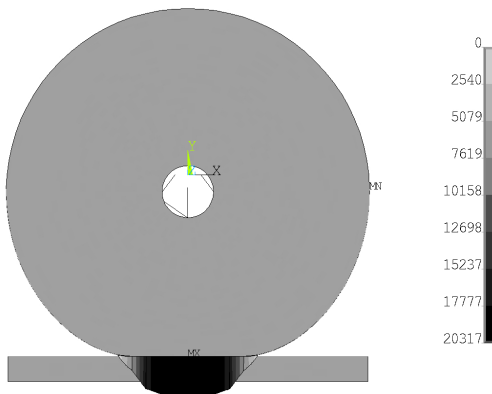


Рис. 3. Эпюра контактных сил

На рис. 4 схематически приведены деформации шины при обжатии о дорожное полотно. Очевидно, что линейная скорость на участке пути  $S$  является не одинаковой, так как при фиксированной частоте вращения колеса радиусы  $R_1$  и  $R_2$  различны ( $R_2 > R_1$ ).

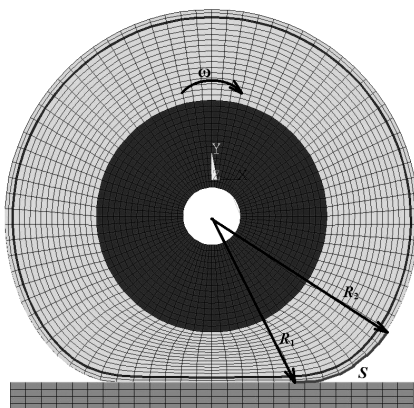


Рис. 4. Схема к определению дополнительных сил инерции

Таким образом, при входе и выходе из контакта элемент шины испытывает дополнительное изменение скорости (замедляется или ускоряется) – возникают дополнительные инерционные силы. Следовательно,

определение деформирования шины при ее стационарном качении возможно с учетом следующего комплекса нагрузок: вертикальная нагрузка от веса автомобиля, силы взаимодействия шины с дорожным покрытием, центробежные силы и силы дополнительные, силы инерции. При этом четко заданной является только вертикальная нагрузка. Распределение же инерционных сил и сил взаимодействия шины с дорогой зависит от скорости движения автомобиля, геометрических параметров конструкции и механических свойств самой шины, а поэтому могут быть определены только в результате решения задачи ее контакта с дорогой.

### Анализ деформирования шины при её стационарном качении

Используя такой подход, в работе была проведена серия исследований по выявлению закономерностей деформирования стационарно катящейся шины и по определению возникающего в ней момента сопротивления. На рис. 5 приведены поля перемещений, возникающие в шине, стационарно катящейся с различными скоростями линейного движения оси колеса (осевая сила  $F=3000$  Н).

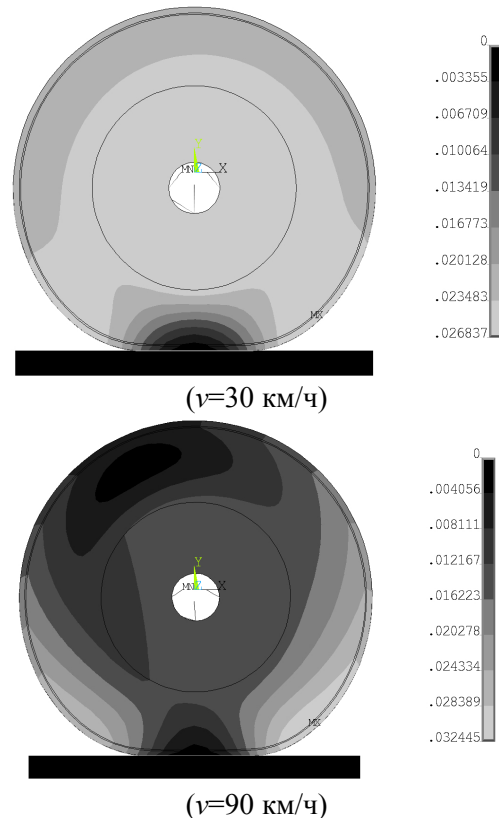


Рис. 5. Характер деформирования пневматической шины при стационарном качении с различной скоростью

Из представленных результатов видно формирование асимметрии в картине деформирования шины при стационарном качении, а также изменение радиальных перемещений диска колеса в зависимости от скорости вращения.

Действительно, прогиб шины, который определял ее статический радиус при качении, меняется. Соответствующая величина называется динамическим радиусом и характеризует форму деформированного при качении колеса.

Представленный подход к расчету стационарного качения шины позволяет определить динамический радиус и выявить закономерность его формирования при изменении скорости движения колеса (рис. 6).

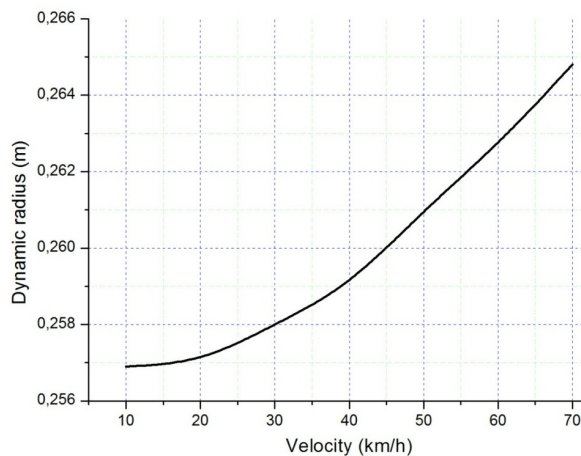


Рис. 6. Зависимость динамического радиуса шины от скорости движения колеса

Результаты показывают, что вариация динамического радиуса относительно статического в пределах диапазона изменения скорости движения от 0 до 100 км/час не превышает 3 %.

Полученные расчеты позволяют также провести анализ формирования контактных сил при стационарном качении шины. Эпюры распределения контактных давлений и касательных контактных сил приведены на рис. 7.

Как видно из полученных результатов, методика позволяет определить искривление (асимметрию) эпюры контактных усилий в сторону качения колеса, что приводит к возникновению момента сил, который реализует сопротивление качению.

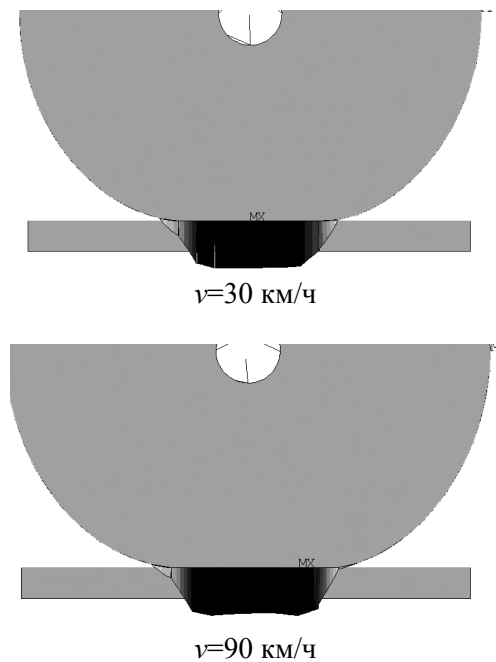


Рис. 7. Контактные давления пневматической шины при стационарном качении с различной скоростью

На рис. 8 приведена зависимость сопротивления качению от скорости.

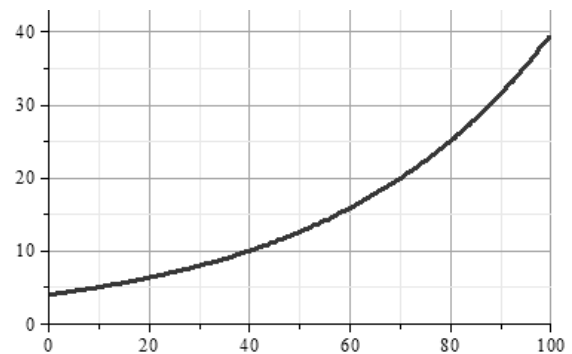


Рис. 8. Зависимость момента сопротивления качению [Нм] от скорости [км/ч]

Анализ полученных закономерностей показывает, что зависимость момента сопротивления движению носит экспоненциальный характер. Такое предположение дает возможность аппроксимировать результаты численных экспериментов и получить аналитическое выражение для момента сопротивления. Предположим, что момент сопротивления качению имеет вид

$$M_t = a \cdot \exp(\alpha \cdot v), \quad (1)$$

где  $a$ ,  $\alpha$  – параметры аппроксимации (определяются из численного эксперимента),

$v$  – линейная скорость движения колеса (заданная в км/час). Закон хорошо согласовывается с полученным графиком (рис. 8) при следующих параметрах:  $a=3,96$ ;  $\alpha=0,038$ .

Хотелось бы отметить, что момент сопротивления качению – очень комплексная величина, которая образуется на фоне разных явлений и факторов, причем на разных скоростях движения эти факторы влияют неодинаково [2]. В данной работе рассмотрена только одна составляющая, определяющая момент сопротивлению качения. Полученные результаты искажены в области малых скоростей движения, т.к. в этом случае сопротивление качению формируется за счет влияния микропрофиля дороги, т.е. фактически оно определяется трением шины по дорожному покрытию и радиусом качения колеса. Кроме того, не учитывается влияние вязко-упругих сил в резино-подобных материалах шины, которые приводят к рассеиванию энергии в тепло (нагрев шины) и также формируют момент сопротивления, наиболее существенный на малых скоростях движения.

### Выводы

В работе предложена плоская эквивалентная модель пневматической шины. Модель построена таким образом, что геометрически описывает основные конструктивные элементы (протектор, бреккер, боковину и диск). Свойства отдельных слоев определены из условия эквивалентности ее деформирования в статическом положении к результатам, полученным ранее на основе детальных трехмерных моделей. Проведен анализ расчетов деформирования плоской модели пневматической шины при ее стационарном качении по твердой поверхности. Определены закономерности формирования динамического радиуса шины. При этом установлено, что его вариация относительно статического не превышает 3%. Теоретически определена компонента момента сопротивления каче-

нию, которая формируется в результате искажения деформации шины при стационарном качении под действием дополнительных сил инерции и является основной составляющей на эксплуатационном диапазоне скоростей.

### Литература

1. Бухин Б.Л. Введение в механику пневматических шин / Б.Л. Бухин. – М.: Химия, 1988. – 224 с.
2. Кнороз В.И. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз. – М.: Транспорт, 1978. – 238 с.
3. Clark S.K. The pneumatic tire / S.K. Clark (Chairman of Editorial Board) et al // National Highway Traffic Safety Administration. – USA Dep. Of Transportation, 2006. – P. 708.
4. Пневматическая шина / А.Н. Ларин, В.Е. Росоха, А.В. Сергеев и др. – Х.: ХНАДУ, 2003. – 140 с.
5. Ларин А.А. Компьютерное моделирование пневматической шины с учетом ее внутренней многослойной структуры и ортотропии механических свойств / А.А. Ларин, Ю.В. Арефин // Вестник НТУ «ХПИ». Тематичний випуск. Динаміка і міцність машин: зб. наук. пр. – Х.: НТУ «ХП». – 2010. – № 69. – С. 72–78.
6. Арефін Ю.В. Визначення статичного напружено-деформованого стану пневматичної шини в лінійній тривимірній постановці / Ю.В. Арефін, О.М. Ларін, О.О. Ларін, О.І. Субочев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2010. – № 1(10). – С. 54–58.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2011 г.