

Теоретическая оценка работоспособности перспективных конструкций непневматических шин

Г.П. Еремин¹, А.Б. Карташов¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

Обоснована актуальность применения непневматических шин на современных образцах автомобильной техники. Предложен метод сравнительного анализа различных конструкций непневматической шины на основе статического расчета и анализа их тепловой нагруженности. Даны выводы о работоспособности конструкций, целесообразности их применения, а также о практической ценности предлагаемого метода.

E-mail: eremingeorgy@mail.ru; kartashov@bmstu.ru

Ключевые слова: колесный движитель, полиуретан, метод конечных элементов, математическое моделирование, ведомый режим качения колеса.

Сегодня производители шин активно ведут работы по разработке конструкций, способных поддерживать автомобиль в рабочем состоянии при падении давления воздуха в шине. Один из путей решения этой проблемы — применение безвоздушных шин, устойчивых к перепадам давления, температуры и проколам. Все эти свойства достигаются, как правило, установкой на колесо специального упругого элемента, воспринимающего все нагрузки и обеспечивающего плавное движение автомобиля без применения газонаполненной оболочки.

Непневматические шины (НПШ), не требующие создания избыточного давления внутри покрышки, особенно актуальны для бронированной техники; они также используются в сельском хозяйстве, транспортных погрузчиках, карьерных самосвалах, скутерах и велосипедах. Несомненное достоинство таких шин — устойчивость к проколам, основной недостаток — невозможность использования конструкции на высоких скоростях при применении традиционных эластичных материалов вследствие высокого тепловыделения, приводящего к разрушению. Использование современных композиционных материалов, обладающих малым внутренним гистерезисным демпфированием, открывает новые возможности применения НПШ. Конструкция такого колеса должна обладать необходимой несущей способностью, боковой жесткостью, малым сопротивлением качению и надежностью, при этом необходимо эффективно отводить выделяющуюся теплоту во время эксплуатации [1].

На сегодняшний день наибольшее распространение получили монолитные конструкции, выполненные из различных сортов резины

и полиуретана. Перед разработчиками подобных систем стоит задача выбора наиболее удачного конструктивного облика шины не только исходя из параметров прочности, надежности, обеспечения требуемых упругих и демпфирующих характеристик, но и с учетом специфических требований, таких как обеспечение наилучшей способности отдавать теплоту в окружающую среду при эксплуатации автомобиля и самоочищения при загрязнении.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ конструкций НППШ с различным исполнением упругого элемента и выбор наиболее рациональной конструкции из условия обеспечения необходимой несущей способности и тепловой нагруженности.

Объектом исследования служил легковой автомобиль с колесной формулой 4×4 со следующими характеристиками: полная масса 1500 кг; свободный радиус колеса при номинальной нагрузке 308 мм; скорость движения в городском режиме 40 км/ч; максимальная скорость движения 100 км/ч.

В качестве материала НППШ предложено использовать полиуретан марки СКУ-ПФЛ-100М. Сочетание высокой твердости с эластичностью и термостабильностью обуславливает возможность применения данного материала в качестве конструкционного для создания автомобильной НППШ. Материал имеет следующие характеристики: временное сопротивление 26 МПа, модуль упругости 52 МПа, коэффициент Пуассона 0,47, максимальная температура эксплуатации 80 °С.

В современной практике для решения подобных задач существуют различные методы, такие как проведение натурных или лабораторных испытаний и численное математическое моделирование. В первом случае необходимы затраты большого количества времени на проведение достаточного количества дорогостоящих экспериментов, во втором — требуется намного меньше времени для получения результата, позволяющего с достаточной точностью судить о работоспособности исследуемых конструкций. К численным относится метод конечных элементов (МКЭ), получивший в наши дни широкое распространение.

В качестве исследуемых были выбраны две конструкции НППШ. Первая (рис. 1, *а*) имеет вид обода, соединенного с крышкой посредством упругих спиц; упругий элемент второй конструкции (рис. 1, *б*) выполнен в виде сот. Были созданы трехмерные модели предлагаемых конструкций в программном комплексе SolidWorks. Модели имели одинаковые габаритные размеры, рисунок протектора и толщину стенок упругого элемента.

Расчетная модель (рис. 2) представляет собой элемент ступицы в сборе с шиной. Конструкция покоится на неподвижной опорной поверхности (ОП). Перемещения и повороты конструкции в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения колеса, и плоскости ОП отсутствуют. К элементу ступицы приложена вертикальная сила $P_z = 3\,675\text{ Н}$, что соответствует весу, приходящемуся на одно колесо.

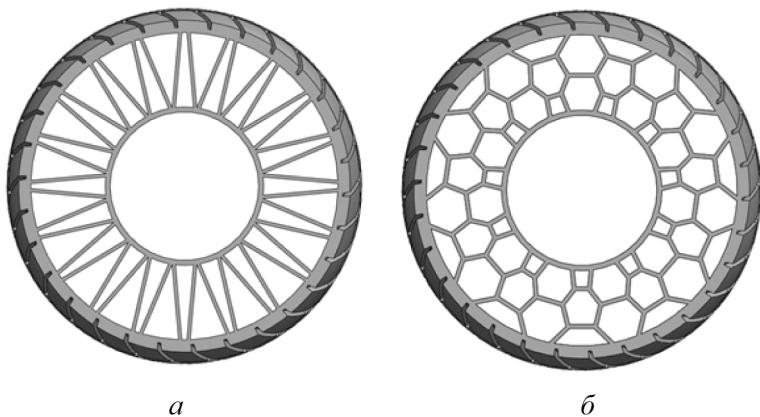


Рис. 1. Трехмерные модели исследуемых конструкций НППШ

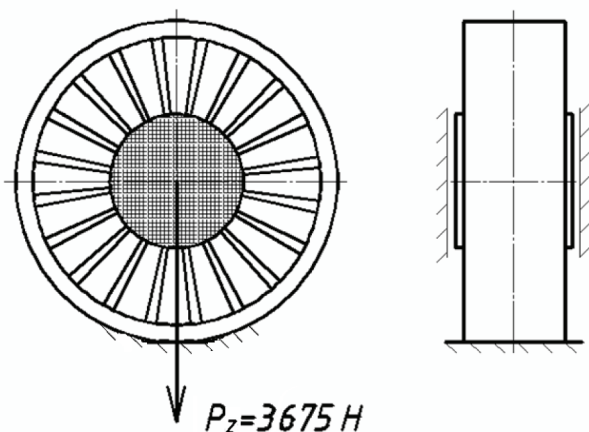
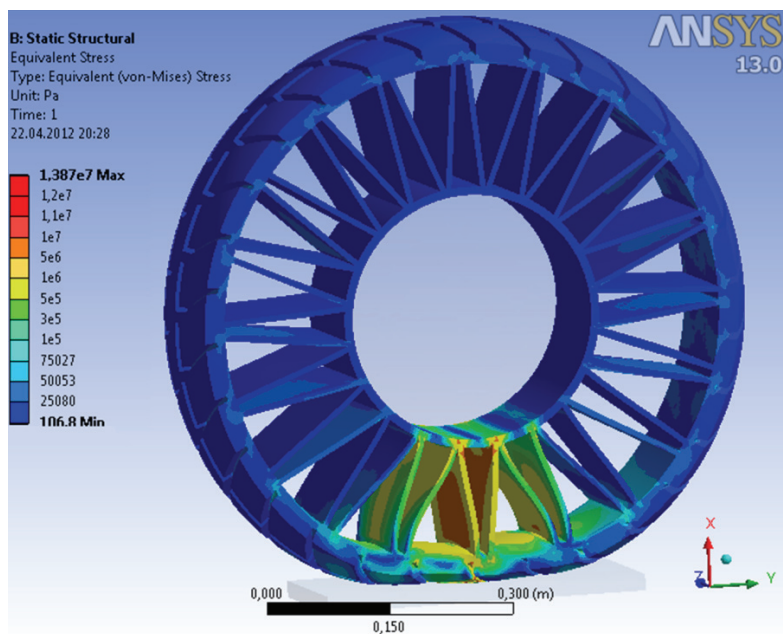


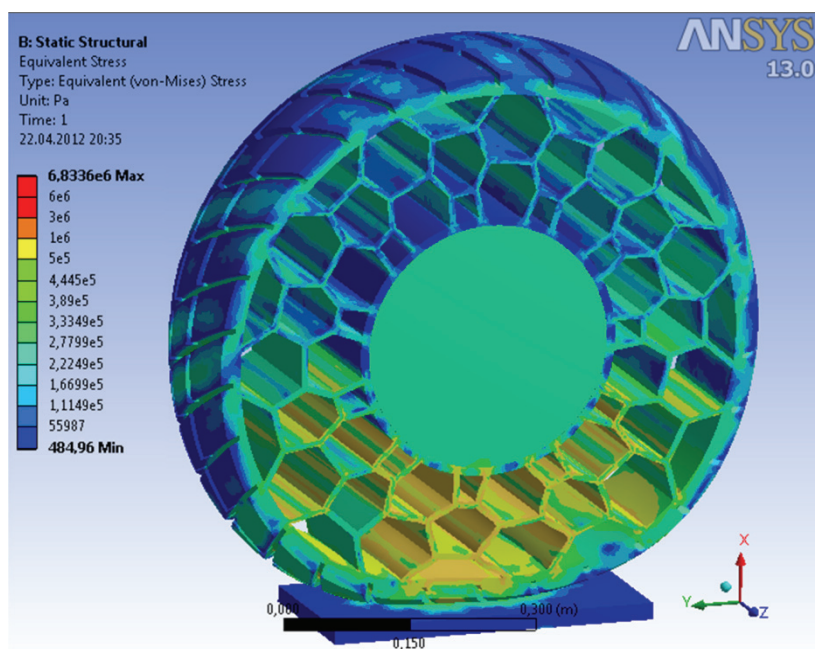
Рис. 2. Расчетная схема статического нагружения НППШ

Исследования по определению несущей способности НППШ проводили в программном комплексе конечно-элементного анализа Ansys Workbench, включающем в себя генератор сетки конечных элементов и современный расчетный модуль. В качестве модели материала использовали изотропный упругий материал, характеризующийся модулем упругости первого рода и коэффициентом Пуассона. Конечно-элементная модель (КЭМ) конструкции с упругими спицами насчитывала 88 630 элементов и 347 722 узла, а сотовой конструкции — из 88 468 элементов и 366 346 узлов. Тип конечного элемента в обоих случаях — SOLID186.

Напряженно-деформированное состояние обеих конструкций, полученное в результате проведенных исследований по определению несущей способности, приведено на рис. 3.



a



б

Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние конструкции с упругими спицами (а) и сотовой конструкции (б)

Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод о том, что конструкция с упругим элементом в виде спиц обладает меньшей несущей способностью, поскольку напряжения локализуются вблизи зоны контакта с ОП. Спицы конструкции работают на устойчивость и после потери несущей способности изгибаются, что в свою очередь провоцирует изгиб соседних спиц. В результате происходящих процессов конструкция «оседает» вблизи пятна контакта. Иную картину можно наблюдать в конструкции с упругим элементом в виде сот. Вследствие более сложной картины нагружения напряжения перераспределяются на большем объеме упругого элемента, что вызывает значительные деформации, однако повышает несущую способность.

Анализ тепловой нагруженности НППШ на данном этапе исследования проводили только для случая ведомого режима качения колеса, когда проскальзывание в пятне контакта шины с ОП минимально. Это означает, что основной источник теплоты будет при этом распределен по всей площади поверхности конструкции. Предлагаемая модель для теплового расчета в этом случае представляла собой НППШ с элементом ступицы, движущуюся по неподвижной ОП поступательно со скоростью 40 км/ч и вращающуюся с угловой скоростью 22 об/с (рис. 4). Колесо погружали в среду, представляющую собой атмосферный воздух при нормальных условиях. Вместе с колесом поступательное движение совершал элемент кузова автомобиля. На основе экспериментов, проводимых с безвоздушными шинами, коэффициент сопротивления качению принимали равным 0,02 [2], а коэффициент сцепления 0,6, что соответствовало случаю движения автомобиля по грунтовой дороге.

При расчете сделаны следующие допущения:

- вся поверхность элемента колеса, кроме элемента ступицы, излучает тепловую энергию;
- элементы кузова автомобиля представляют собой прямоугольные стенки и взаимодействуют с границами модели воздуха;
- нижняя граница модели воздуха перемещается со скоростью 40 км/ч и не взаимодействует с элементом ОП механически;
- рисунок протектора заменен гладкой тороидальной поверхностью.

Расчет проводили для ведомого режима качения колеса, в этом случае мощность тепловыделения в шине

$$N_f = v_x P_z f,$$

где v_x — скорость движения автомобиля; P_z — сила, приходящаяся на одно колесо; f — коэффициент сопротивления качению.

Мощность тепловыделения в пятне контакта

$$N_s = s P_z r_k \varphi w,$$

где s — коэффициент продольного скольжения колеса; r_k — радиус качения колеса; φ — коэффициент сцепления; w — угловая скорость вращения колеса.

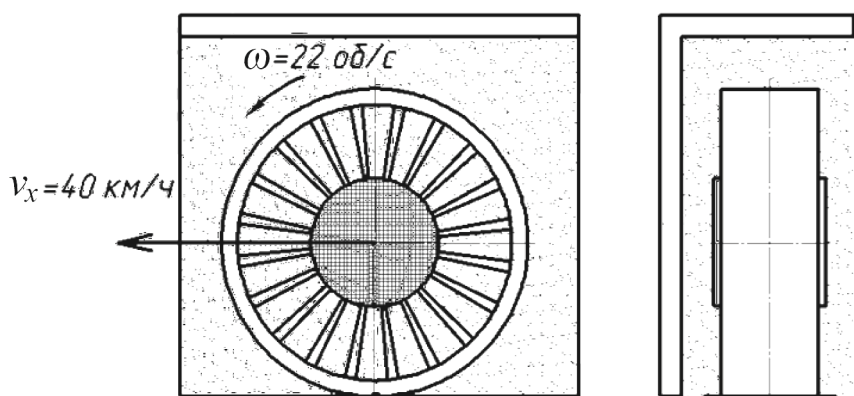
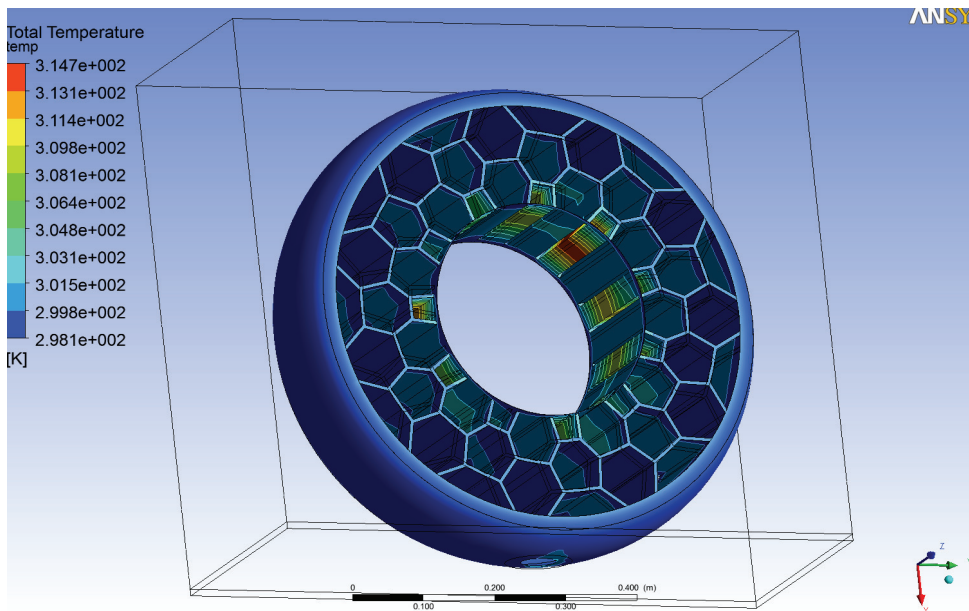


Рис. 4. Расчетная схема анализа тепловой нагруженности НППШ

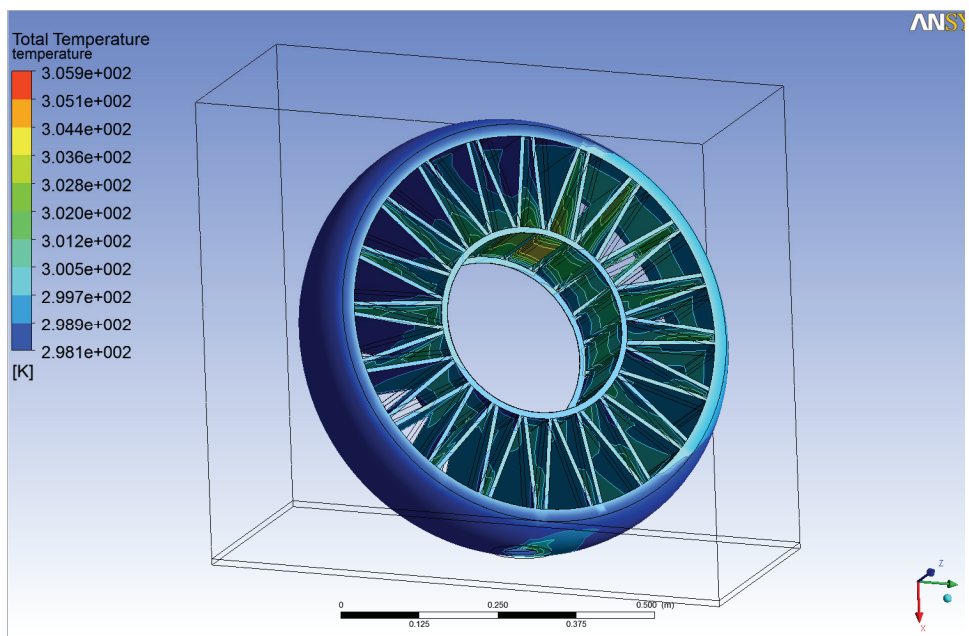
Для проведения расчета в программном комплексе SolidWorks была создана трехмерная модель, включающая в себя модель воздуха — прямоугольный параллелепипед с полостью, повторяющей геометрию изучаемой шины, а также модели исследуемой конструкции и элемента ОП. Модель импортирована в программу Ansys CFX. Данный программный модуль позволяет создать конечно-элементную модель конструкции и провести ее аэродинамический расчет на основании уравнений Навье — Стокса. Модель атмосферного воздуха взята из библиотеки материалов Ansys. В расчете использовали принцип обращенного движения, т. е. конструкция обдувается набегающим потоком воздуха и не совершает поступательного движения. Набегающий поток воздуха имеет скорость 40 км/ч, давление потока на выходе атмосферное, температура воздуха 25 °С. Верхняя и одна из боковых граней модели воздуха ограничены стенками, взаимодействующими с потоком посредством скольжения воздуха относительно них. Противоположная грань представляет собой стенку, не взаимодействующую с воздушным потоком. Нижняя грань взаимодействует с воздушным потоком и движется со скоростью 40 км/ч. Расчет проводили для промежутка времени в 2 ч с целью определения момента наступления термодинамического равновесия.

На рис. 5 показано распределение температур в упругих элементах шин обоих типов, а на рис. 6 — характер обтекания обоих колес воздушными потоками.

В результате расчетов установлено, что максимальная температура нагрева колеса с упругим элементом в виде сот после наступления термодинамического равновесия системы составляет 41 °С, а в виде спиц — 35 °С. Воздушные потоки могут циркулировать в полостях упругого элемента.

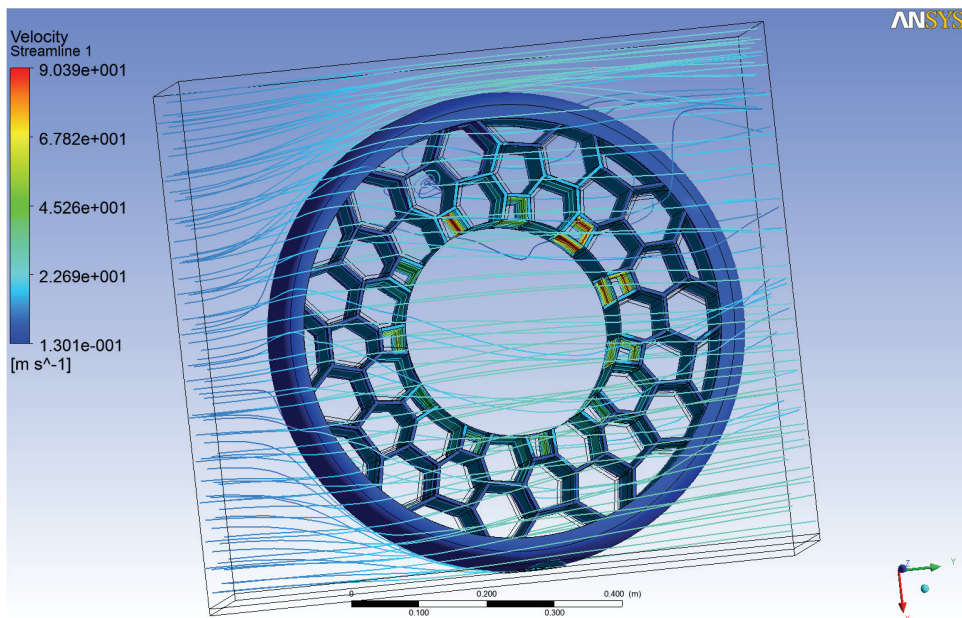


a

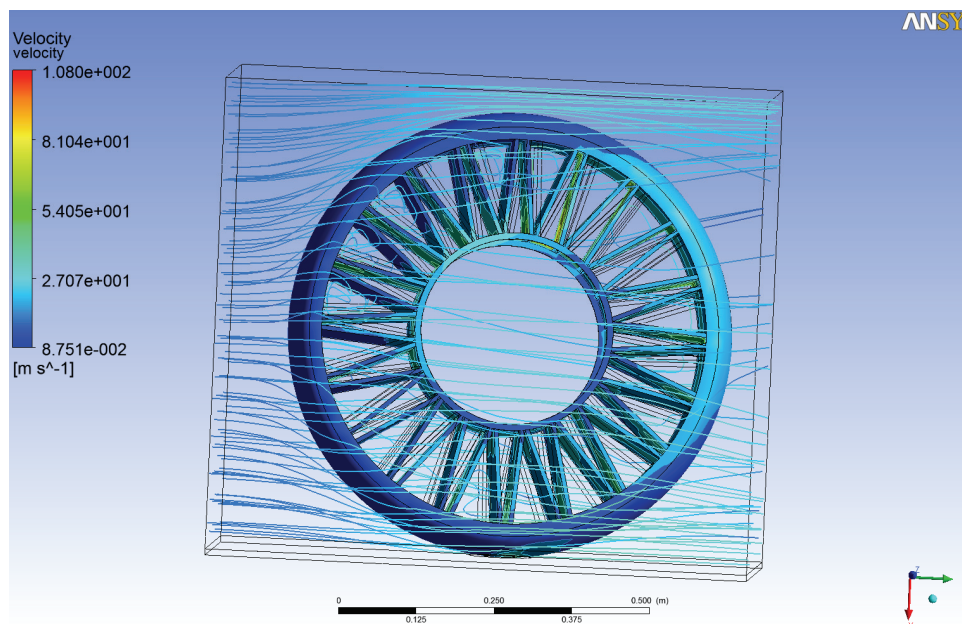


б

Рис. 5. Распределение температур нагрева колеса с упругим элементом в виде сот (а) и спиц (б)



a



б

Рис. 6. Распределение воздушных потоков в колесе с упругим элементом в виде сот (а) и спиц (б)

На основе проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что максимальные напряжения и уровень максимальной температуры нагрева конструкций свидетельствуют об их работоспособности. Температура нагрева обоих колес увеличивается по мере приближения к центру колеса в радиальном, а также в осевом направлении. При статическом нагружении колесо с упругим элементом в виде сот имеет бóльшую несущую способность, однако деформируется значительно, чем колесо с упругим элементом в виде спиц. Последнее обладает лучшей теплоотдачей, а характер его деформации больше подходит на характер деформации колеса с пневматической шиной.

Таким образом, на основании проведенных в работе теоретических исследований можно сформулировать выводы для первичной оценки работоспособности НППШ на стадии проектирования. Обе конструкции являются работоспособными, однако конструкция с упругим элементом в виде спиц превосходит сотовую конструкцию по характеристикам теплоотдачи и проигрывает ей в несущей способности. Последний недостаток легко компенсируется увеличением толщины стенки упругого элемента. Кроме того, характер деформации такой шины более схож с характером деформации пневматической шины, а значит, она лучше подходит для современного автомобильного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнороз В.И. Работа автомобильной шины. — М.: Транспорт, 1976. — 238 с.
2. Петрушов В.А., Шуклин С.А., Московкин В.В. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов. — М.: Машиностроение, 1975. — 224 с.

Статья поступила в редакцию 05.10.2012.