

УДК 629.322.2:629.015

И. И. ПРОНЕВИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОБОДА КОЛЕСА НА ХОДОВЫЕ КАЧЕСТВА ВЕЛОСИПЕДА

На основе модели велосипедного колеса как жесткого диска, к ободу которого на одинаковых расстояниях друг от друга присоединены пружины, выполнен анализ сил сопротивления качению. Приведены результаты сравнения мощности этих сил для случаев двустенного и одностенного обода.

Ключевые слова: велосипед, сопротивление качению, обод колеса.

В настоящее время велосипед является одним из основных средств индивидуального передвижения людей. Его использование дает возможность достаточно быстро добраться в необходимую точку, и в то же время он не загрязняет окружающую среду и позволяет улучшить состояние здоровья человека. Очевидно, что при поездках на велосипеде человек не должен испытывать чрезмерных нагрузок. Поэтому практический интерес представляет анализ сил сопротивления, возникающих при движении велосипеда.

В работах [1, 2] представлены различные конструкции шин транспортных средств, предложен вариант их классификации.

Большинство исследований механики движения велосипеда осуществлялось экспериментальными методами. Так, в статье [3] описаны результаты испытаний, которые показали, что преобразование крутящего момента, приложенного к эластичному колесу, в действующую на его обод окружную силу определяется радиусом качения без скольжения и не зависит от динамического радиуса колеса.

Анализ влияния на сопротивление качению шин горных велосипедов диаметра колеса, типа местности, массы велосипедиста, давления в шинах и типа подвески приведен в публикации [4]. Аналогичные исследования представлены в работе [5], где показано, что сопротивление качению шин диаметром 26 дюймов больше, чем у 29-дюймовых шин. Результаты испытаний, проведенных для четырех пневматических велосипедных колес разного размера, которые описаны в работе [6], также продемонстрировали, что сопротивление качению уменьшается при увеличении диаметра.

Выполненный в статье [7] анализ показал, что при движении маунтинбайка аэродинамическое сопротивление составляет от 8 до 35 % от суммарных сил сопротивления. В свою очередь сопротивление качению гладких шин оказалось на 20 % меньше, чем у шипованных. В работе [8] описаны эксперименты по сравнению характеристик пяти разных модификаций шин

для маунтинбайка. Показано, что существующие их расчетные модели приводят к некорректной оценке параметров, определяющих сопротивление качению. В статье [9] предложен экспериментальный метод оценки сил сопротивления качению на специальном тренажере, который позволил установить влияние на эти силы давления в шинах.

В работе [10] предложена методика математического моделирования деформирования велосипедного колеса, в которой его обод рассматривается как изгибаемый криволинейный стержень замкнутого профиля и которая, несмотря на введенные упрощения, позволяет получать результаты, близкие к экспериментальным.

В [11] обобщены теоретические и экспериментальные результаты, связанные с изучением сопротивления качению велосипедных колес, и представлены графики, описывающие влияние некоторых параметров на коэффициент сопротивления качению. Здесь также приведен анализ возможных путей снижения затрат энергии на движение велосипеда, включающих, в том числе, изменение формы и размеров поперечного сечения обода и шины.

Целью представленной работы является анализ влияния формы обода велосипеда на сопротивление качению колес велосипеда. Рассматриваются дополнительные аспекты к материалам, изложенным в блоге автора статьи [12].

При движении велосипеда по ровной твердой поверхности на его ходовые свойства значительное влияние оказывает геометрия покрышек – в случаях, если их поверхность не имеет выступов, и при более высоком давлении воздуха в них, деформации оказываются меньшими, что приводит к уменьшению работы сил сопротивления качению и, соответственно, более легкому ходу велосипеда.

Выполненный анализ показывает, что работа сил сопротивления качению также зависит от формы ободов велосипеда – он при прочих равных условиях существенно лучше катит, если ободы колес не одностенные, а двустенные. Такой результат связан с тем, что при меньшем объеме и высоте (расстоянии между поверхностями камеры в радиальном направлении) полости, занимаемой воздухом в камере, увеличиваются показатели ее упругости (способность противостоять уменьшению объема, деформациям). Рассматривая воздух в камере как набор множества пружин, расположенных по окружности обода в радиальном направлении, как это показано на рисунке 1, можно предположить, что в одностенном ободе, где высота полости с воздухом больше, последовательно соединены пружины двустенного, в котором высота полости меньше. Жесткость системы при этом понижается. Снижение жесткости также имеет место при увеличении объема воздуха. При изотермическом процессе увеличение давления в некоторое число раз приводит к уменьшению в такое же число раз объема. В случае большего объема абсолютная величина его изменения увеличивается, как и значение деформации. Работа сил упругости, а следовательно, и сил сопротивления качению будет большей, поскольку она пропорциональна коэффициенту упругости (жесткости) и квадрату деформации.

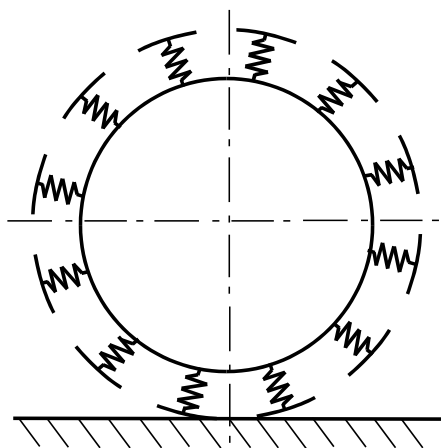


Рисунок 1 – Модель велосипедного колеса, в которой шина представляется набором пружин

Таким образом, чтобы обеспечить уменьшение работы диссипативных сил сопротивления качению следует использовать ободы, способствующие уменьшению объема и высоты воздуха в камере; велосипед в целом при этом станет более жестким (как и при увеличении давления воздуха в шинах) и будет лучше катить по ровной дороге.

Потери энергии в системе «колесо – дорожное полотно» в значительной степени определяются работой диссипативных сил сопротивления качению: чем больше величина этих сил, тем существеннее и потери.

Значения сил сопротивления качению зависят от упругих свойств материалов, из которых изготовлены колеса и дорожное полотно (предполагается, что оно ровное). При увеличении модуля упругости этих материалов упругие деформации сжатия оказываются меньшими, соответственно уменьшаются силы сопротивления качению.

Проведенный анализ показывает, что в зависимости от соотношения между жесткостями колеса и дорожного полотна можно выделить две основные ситуации.

1 Жесткость колеса меньше жесткости дорожного полотна. В таком случае воздух в шине можно рассматривать как совокупность распределенных по поверхности обода (диска) пружин, которые при движении колеса деформируются в радиальном направлении. В соответствии с законом Гука величина деформации обратно пропорциональна коэффициенту жесткости. Как отмечалось выше, увеличение давления воздуха в шине и уменьшение его объема приводят к росту жесткости системы, что, в свою очередь, становится причиной уменьшения работы упругих сил сопротивления качению, а с ней – и снижения потерь энергии.

2 Колесо обладает большей жесткостью по сравнению с дорожным полотном. При такой ситуации уже дорогу можно представить как совокупность пружин, расположенных вдоль линии пути. Наезд колеса на пружину вызывает ее деформацию. Величина суммарной работы сил сопротивления качению, обусловленных деформированием основания, как и в предыдущем случае, оказывается обратно пропорциональной коэффициенту жесткости пружины. На преодоление этой работы затрачивается кинетическая энергия транспортного средства. Следовательно, при ужесточении дорожного покрытия достигается уменьшение потерь энергии.

Таким образом, уменьшению энергетических потерь способствует увеличение жесткости обоих компонентов системы «колесо – дорожное полотно».

Оценим потери энергии, приводящие к дополнительным энергозатратам велосипедиста, в случаях использования колес с одностенным и двустенным ободами.

Для сравнения используем два типа клинчерных ободов примерно одинаковой внутренней ширины (19–20 мм):

1 – двустенный, неглубокий, имеющий сечение, близкое к трубчатому;

2 – одностенный, глубокий, коробчатого сечения.

Радиус колеса $r = 0,34$ м. Принимаем, что в практически сликовых шинах 622–32 мм давление воздуха составляет 620 кПа. Также предполагаем, что на заднее колесо приходится $n_1 = 0,6$, а на переднее – $n_2 = 0,4$ веса велосипеда с велосипедистом.

Значения сил, нагружающих заднее и переднее колеса, соответственно

$$F_1 = mgn_1 = 80 \cdot 9,8 \cdot 0,6 = 470 \text{ Н}; F_2 = mgn_2 = 80 \cdot 9,8 \cdot 0,4 = 314 \text{ Н},$$

где m – масса велосипеда с велосипедистом, $m = 80$ кг; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с².

В качестве расчетной схемы принимаем модель, представленную на рисунке 1. Считаем, что шина моделируется пружинами, которые располагаются между ободом (диском) и покрышкой. Соответственно их длина равна высоте области, занимаемой в шине воздухом. При принятом значении радиуса колеса длине его окружности $l = 2,16$ м. Продольный размер пятна контакта при массе велосипедиста с велосипедом $m = 80$ кг составляет $x = 0,06$ м. Принимая, что ширина пружины, моделирующей шину, равна x , получаем, что общее число пружин

$$N = l/x = 2,16/0,06 = 36.$$

Перемещению колеса на расстояние 1 м соответствует его поворот, при котором колесо совершает часть оборота $f = 1/l = 0,46$ м⁻¹. Учитывая, что за один оборот колеса цикл деформирования совершают все пружины, определим среднюю мощность сил сопротивления качению. Результаты расчета для случая движения велосипеда со скоростью $v = 5,56$ м/с (20 км/ч) сведены

в таблицу 1. Отметим, что в ней в формулах мощности силы сопротивления фигурирует средняя тормозящая сила, которая определяется отношением работы $A_{ij}N$, соответствующей однократному деформированию всех пружин колеса, и пройденного за это время пути $l = 1/f$.

Таблица 1 – Сравнение характеристик двустенного и одностенного ободов

Характеристика	Формула	Двустенный обод	Одностенный обод
Статический прогиб шины заднего колеса, мм	h_{1i}	1,7	2,8
Коэффициент жесткости пружины, кН/м	$k_i = F_1/h_{1i}$	276	168
Статический прогиб шины переднего колеса, мм	h_{2i}	1,1	1,9
Работа, затрачиваемая на деформацию пружины заднего колеса, Дж	$A_{1i} = \frac{k_i h_{1i}^2}{2}$	0,40	0,66
Работа, затрачиваемая на деформацию пружины переднего колеса, Дж	$A_{2i} = \frac{k_i h_{2i}^2}{2}$	0,17	0,30
Мощность силы сопротивления заднего колеса, Вт	$P_{1i} = A_{1i} N f \cdot v$	37	61
Мощность силы сопротивления переднего колеса, Вт	$P_{2i} = A_{2i} N f \cdot v$	16	27
Суммарная потеря мощности, Вт	$P_i = P_{1i} + P_{2i}$	53	88
Коэффициент трения качения заднего колеса, мм	$\eta_{1i} = \frac{P_{1i} r}{F_1 v}$	4,8	7,9
Коэффициент трения качения переднего колеса, мм	$\eta_{2i} = \frac{P_{2i} r}{F_2 v}$	3,1	5,3

Представленный расчет показывает, что затраты мощности на качение колеса с одностенным ободом в 1,66 раза больше по сравнению с двустенным. Увеличение скорости движения в рамках рассмотренной модели ведет к прямо пропорциональному увеличению мощности потерь.

Таким образом, оптимальный подбор шины и обода позволяет существенно уменьшить величину сил сопротивления качению при движении по ровной дороге с твердым покрытием. Для снижения потерь энергии движения необходимо повышать жесткость системы «шина – воздух», чему могут способствовать использование обода с неглубоким внутренним профилем, ободных лент большей толщины для уменьшения высоты воздушного промежутка; применение сликовых шин с более упругими боковыми стенками; увеличение давления в шине. При заданной ширине колеса наименьший коэффициент трения качения будет достигаться при использовании самой узкой шины из рекомендуемого диапазона размеров, что соответствует ободу, имеющему наибольшую внутреннюю ширину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Эволюция колеса / З. А. Кострова [и др.] // Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство. – 2016. – № 2 (113). – С. 121–135.
- 2 Автомобильные шины / В. Л. Бидерман [и др.] – М. : Госхимиздат, 1963. – 384 с.
- 3 **Пожидаев, С. П.** Экспериментальное исследование механической модели эластичного колеса / С. П. Пожидаев, Г. В. Шкаровский // Автомобильный транспорт. – 2019. – Вып. 44. – С. 21–29.
- 4 **Брылев, И. С.** Исследование сопротивления качению двухколесных транспортных средств / И. С. Брылев, С. С. Евтюков // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 2 (79). – С. 161–167.
- 5 **Steyn, W. J. vdM.** Comparison of tyre rolling resistance for different mountain tyre diameters and surface conditions / W. J. vdM. Steyn, J. Warnich // South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation. – 2014. – Vol. 36, is. 2. – P. 179–193.
- 6 Empirical determination of the motion resistance of pneumatic bicycle wheels for on and off-road performance / F. B. Akande [et al.] // African Journal of Agricultural Research. – 2010. – Vol. 5, is. 23. – P. 3322–3332.
- 7 **Bertucci, W. M.** Evaluation of aerodynamic and rolling resistances in mountain-bikes field conditions / W. M. Bertucci, S. Rogier, R. F. Reiser II // Journal of Sports Sciences. – 2013. – Vol. 31, is. 14. – P. 1606–1613.
- 8 **Macdermid, P. W.** The influence of tyre characteristics on measures of rolling performance during cross-country mountain biking conditions / P. W. Macdermid, P. W. Fink, S. R. Stannard // Journal of Sports Sciences. – 2014. – Vol. 33, is. 3. – P. 1–9.
- 9 A new method to measure rolling resistance in treadmill cycling / Y. Henchoz [et al.] // Journal of Sports Sciences. – 2010. – Vol. 28, is. 10. – P. 1043–1046.
- 10 **MontyPythagoras.** Calculation of rim deflection and spoke tension on a bicycle wheel conditions / MontyPythagoras // Matroids Matheplanet [Electronic resource]. – Mode of access : <https://matheplanet.com/default3.html?call=article.php?sid=1663>. – Date of access : 05.09.2022.
- 11 **Wilson, D. G.** *Bicycling Science, Fourth Edition* / D. G. Wilson, T. Schmidt. – Cambridge, MA : MIT Press, 2020. – 568 p.
- 12 **Pranevich, I.** Оценка потерь энергии в системах «колесо – дорожное полотно» [Электронный ресурс] / I. Pranevich. – Режим доступа : <https://forum.velomania.ru/blog.php?b=11252>. – Дата доступа : 05.09.2022.
- 13 **Селифонов, В. В.** Теория автомобиля : учеб. пособие / В. В. Селифонов, А. Ш. Хусаинов, В. В. Ломакин. – М. : МГТУ «МАМИ», 2007. – 102 с.

I. I. PRANEVICH

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

INFLUENCE OF WHEEL RIM SHAPE ON BICYCLE DRIVING PERFORMANCE

An analysis of the rolling resistance forces acting a bicycle wheel is performed considering it as a hard disk with springs attached to its rim at equal distances from each other. The results of comparing the values of these forces for the cases of double-walled and single-walled rims are presented.

Keywords: bicycle, rolling resistance, wheel rim.

Получено 08.10.2022