УДК 343.148.63

© И. С. Брылев, канд. техн. наук, доцент
 © С. С. Евтюков, канд. техн. наук, доцент
 (Санкт-Петербургский государственный
 архитектурно-строительный университет,
 Санкт-Петербург, Россия)
 E-mail: ilya2104@mail.ru, ese-89@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-2-161-167

© I. S. Brylev, PhD. in Sci. Tech., Associate Professor
 © S. S. Evtyukov, PhD. in Sci. Tech., Associate Professor
 (Saint Petersburg State University of Architecture
 and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)
 E-mail: ilya2104@mail.ru, ese-89@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ ДВУХКОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

RESEARCH OF ROLLING RESISTANCE OF TWO-WHEELED VEHICLES

Сопротивление качению шины велосипеда — основной фактор, влияющий на характеристики двухколесного транспорта. Изучение сопротивления качению позволяет лучше понять преимущества разных диаметров колес. Поскольку сопротивление качению является показателем поведения транспортного средства на определенной местности, его можно рассматривать как объективный параметр для сравнения характеристик двух размеров колес (26 и 29 дюймов). Целью данного исследования было оценить сопротивление качению для горных велосипедов, зависящее от нескольких параметров: диаметра колеса, типа местности, массы велосипедиста, давления в шинах и типа подвески.

Ключевые слова: сопротивление качению, двухколесное транспортное средство, дорожное покрытие.

Rolling resistance of a bicycle tire is the main factor that affects the characteristics of two-wheeled vehicles. The study of rolling resistance allows better evaluating the advantages of different wheel diameters. Since rolling resistance is an indicator of the vehicle behavior on a particular terrain, it can be considered an objective parameter for comparing the characteristics of two wheel sizes (26 and 29 inches). The purpose of this study was to evaluate rolling resistance of mountain bikes, depending on several parameters: wheel diameter, terrain type, cyclist mass, tire pressure, and suspension type.

Keywords: rolling resistance, two-wheeled vehicle, road surface.

Силы сопротивления на велосипед включают сопротивление качению, уклону и воздуху. Скорость велосипеда оказывает большое влияние на общее сопротивление велосипеда. Сила сопротивления воздуха начинает действовать при скорости выше 10 км/ч. Эффект неравномерного сопротивления можно минимизировать, используя испытательный участок горизонтальной местности и выполняя испытание в обоих направлениях. Сопротивление воздуха можно минимизировать, выполняя испытания на сопротивление качению в безветренный день [1, 2, 3].

Сила сопротивления качению, испытываемая колесом под нагрузкой W , определяется по уравнению

$$F_r = C_r W, \quad (1)$$

где F_r — сопротивление качению (Н); W — нагрузка на колесо (Н) (нагрузка считается постоянной для эксперимента, поскольку велоси-

педист не меняет положение в течение эксперимента).

Коэффициент сопротивления качению (КСК) (безразмерный) определяется по формуле

$$C_r = \frac{C_l}{r}, \quad (2)$$

где C_l — коэффициент сопротивления качению или коэффициент трения качения с размерной длиной (м); r — радиус колеса (м).

Сила сопротивления воздуха определяется по следующему уравнению:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2, \quad (3)$$

где F_d — сопротивление воздуха (Н); ρ — плотность воздуха в месте проведения испытаний, равная 1,07 кг/м³ (предполагается, что плотность остается постоянной для эксперимента, поскольку он проводится на той же высоте и в том же месте); C_d — коэффициент аэродинами-

ческого сопротивления, равный 0,76 (безразмерный); эта постоянная используется для определенных моделей велосипедов и велосипедистов в экспериментах; A — передняя проекция площади велосипеда и велосипедиста, равная $0,509 \text{ м}^2$ (измеренная и предполагаемая постоянная для моделей велосипедов и велосипедистов, используемых в экспериментах); V — скорость относительно воздуха (м/с) [4, 5, 6].

Сила сопротивления градиента определяется по уравнению

$$F_g = WG, \quad (4)$$

где F_g — градиент силы сопротивления (Н); W — нагрузка на колесо (Н); $G = \frac{h}{l}$ — уклон (м/м).

Следовательно, общее сопротивление, испытываемое велосипедом, рассчитывается по формуле

$$F_T = F_r + F_d + F_g. \quad (5)$$

Мощность, необходимая для преодоления движущей силы на определенной скорости, может быть рассчитана с использованием уравнения

$$P = F_T V, \quad (6)$$

где P — мощность (Вт); F_T — общая сила сопротивления (Н).

Испытание накатом является стандартным способом определения сопротивления качению транспортного средства [7–10]. При проведении данного теста выполняются следующие шаги:

- разгоняемся до заданной скорости (v) (контролируя скорость спидометром);
- дальше следует свободно ехать по прямой линии, пока велосипед не остановится;
- измеряем расстояние (s) и время (t), необходимое для остановки велосипеда;
- определяем коэффициент сопротивления качению, используя уравнение

$$C_{r,g} = \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (7)$$

где ΔV — разница между начальной (V_0) и конечной (0) скоростью (м/с); Δt — время, необходимое для остановки (с).

$F_g = 0$ — при уклоне 0 град, а также $F_g \approx 0$ — при относительно медленной начальной скорости.

Для определения среднего результата испытание накатом должно быть выполнено в обоих направлениях определенного участка местности.

Это устраняет влияние любых небольших различий.

Для испытания накатом были выбраны четыре горизонтальных участка с различными типами поверхностей. Четыре поверхности были выбраны для реалистичного представления участков, встречающихся на маршрутах горных велосипедов (рис. 1). В качестве препятствия использовался камень высотой 100 мм, выбранный таким образом, чтобы не повреждать шины. Метод определения потери импульса из-за большого препятствия был разработан для того, чтобы дать возможность оценить наибольшие риски (гораздо большие, чем при наезде на обычные неровности или препятствия, такие как мелкие камни) и для определения количественной оценки (чтобы обеспечить сравнение между ситуациями), что имеет практическое значение для велосипедиста [11, 12].

Чтобы определить местоположение (GPS) (с погрешностью $\pm 0,5 \text{ км/ч}$), использовались два устройства для измерения и сбора скорости и местоположения горных велосипедов во время испытаний [14, 15, 16]. При анализе данных было исключено последнее измерение (скорость менее 2 км/ч), поскольку велосипедист терял равновесие на этой низкой скорости и практически оставался на месте. Исключение этих данных не оказало существенного влияния на результаты анализа.

В эксперименте участвовало три велосипедиста. Их массы были скорректированы с помощью дополнительных грузов для достижения 75, 85 и 95 кг. Велосипедисты разгонялись до 15 км/ч , чтобы учитывать в измерениях и расчетах сопротивление воздуха [17, 18]. У всех велосипедистов площадь фронтальной проекции была такая же, как и в уравнении (3). В эксперименте использовались четыре горных велосипеда: с одним амортизатором и 26 дюймовыми колесами GT Zaskar Niner (GT26), с двумя амортизаторами и 26 дюймовыми колесами Stinger Highlander 200D (200D26), с одним амортизатором и 29 дюймовыми колесами GT Zaskar Niner (GT29) и с двумя амортизаторами и 29 дюймовыми колесами Stinger Highlander 200D (200D29). Чтобы посчитать коэффициенты сопротивления качению, для каждого из полученных наборов данных была собрана информация с устройств GPS для каждого из тестов и проанализированы с ис-

Рис. 1. Четыре типа используемых поверхностей

пользованием уравнений (1)–(7). В этой статье коэффициенты сопротивления качению использовались в обсуждениях и анализе.

Все рассчитанные коэффициенты сопротивления качению показаны на рис. 2. Данные были проанализированы для каждого из различных параметров в отдельности на основе средних коэффициентов сопротивления качению, рассчитанных для каждого из различных параметров. В табл. 1 представлены среднее, стандартное отклонение (SD) и коэффициент вариации (CoV) коэффициента сопротивления качению, рассчитанного для пяти основных параметров, указанных в табл. 1 и исследованных в статье. Эти значения были использованы в анализе с малым SD и значениями CoV , чтобы получить относительно небольшие различия между параметрами [19, 20]. На горизонтальной оси рис. 2 указыва-

ется тип подвески, диаметр колеса, масса велосипедиста, давление в шинах и вид поверхности.

Среднее сопротивление качению колеса диаметром 26 дюймов было выше, чем у колеса диаметром 29 дюймов. Данные коэффициента сопротивления качению для двух диаметров колеса и типов подвески на различных видах поверхности приведены на рис. 3, на котором видно, что диаметр колеса 26 дюймов (с обоими типами подвески) имел более высокое сопротивление качению на песке, траве и гравии. Однако для асфальта различия были незначительными. Таким образом, данные показывают, что диаметр колеса 29 дюймов должен обеспечивать преимущество при езде по бездорожью, но на асфальтированных поверхностях это преимущество будет незначительным.

Данные табл. 1 и рис. 3 показывают, что асфальт имеет самые низкие средние коэффици-

Рис. 2. Коэффициенты сопротивления качению (с учетом типа велосипеда, массы велосипедиста, диаметра колеса, давления в шинах и вида поверхности)

енты сопротивления качению, затем следуют травяное покрытие и гравий с одинаковыми значениями, а песчаная поверхность имеет самый большой средний коэффициент сопротивления

качению — от 4,5 до 15 раз выше, чем у остальных поверхностей.

Данные табл. 1 и рис. 2 показывают, что более высокое давление в шинах привело к снижению сопротивления качению. Данные табл. 1 соответствуют трем измерениям каждого опыта.

При оценке полученных результатов для всех пяти исследованных параметров тип поверхности показал наибольшее влияние на коэффициент сопротивления качению, затем на диаметр колес и давление в шинах. Масса велосипедиста и тип подвески косвенно влияли на сопротивление качению. Это может быть связано с относительно небольшой разницей в массе велосипедистов, участвующих в эксперименте.

В качестве окончательной оценки параметров в табл. 2 приведены коэффициенты корреляции для оцениваемых параметров. Полученные данные подтвердили, что тип поверхности сильнее всего влияет на сопротивление качению, а масса велосипедиста и диаметр колеса имеют второстепенное значение.

В последнем тесте оценивалось влияние препятствия (камня) высотой 100 мм на расстояние, которое может пройти велосипед до остановки после наезда на камень. Цель состояла в том, чтобы определить, в какой степени препятствие повлияет на скорость движения велосипедиста. Процент пройденного расстояния каждым горным велосипедом после преодоления препятствия показан в табл. 3. Более высокие зна-

Таблица 1
Средний КСК, отклонение КСК, коэффициент вариации для всех видов испытаний

Исследуемый параметр	Средний КСК	Отклонение КСК	Коэффициент вариации, %
Тип поверхности			
Асфальт	0,004	0,002	28
Трава	0,009	0,003	26
Гравий	0,008	0,001	33
Песок	0,034	0,005	19
Давление в шинах			
180 кПа	0,012	0,010	90
250 кПа	0,014	0,010	95
500 кПа	0,013	0,011	112
Масса велосипедиста			
75 кг	0,011	0,010	105
85 кг	0,014	0,010	97
95 кг	0,0114	0,010	95
Диаметр колеса			
26 дюймов	0,013	0,012	98
29 дюймов	0,10	0,008	93
Тип подвески			
Один амортизатор	0,011	0,012	101
Два амортизатора	0,012	0,011	95

Рис. 3. Коэффициенты сопротивления качению для четырех велосипедов (с учетом диаметра колеса и типа подвески)

чения указывают на то, что горный велосипед остановился на более коротком расстоянии после преодоления препятствия (большая потеря импульса), то есть значение 100 % означает, что горный велосипед остановился у препятствия. Испытание на преодоление препятствия проводилось только на асфальте.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между сопротивлением качения и исследуемым параметром

Параметр	Коэффициент корреляции
Давление в шинах	-0,05
Диаметр колеса	0,03
Масса велосипедиста	0,03
Поверхность	0,8

Сделаны следующие выводы:

- колесо диаметром 26 дюймов (с обоими типами подвески) имеет более высокий коэффициент сопротивления качению, чем колесо диаметром 29 дюймов на песке, траве и гравии, однако на асфальте различия невелики;
- на песке коэффициент сопротивления качению был от 4 до 16 раз больше, чем на гравии, траве и асфальте;
- в эксперименте не было выявлено разницы в сопротивлении качению при использовании подвески с одним амортизатором или с двумя на четырех оцениваемых поверхностях;
- тип поверхности показал наибольшее влияние на коэффициенты сопротивления качению оцениваемых горных велосипедов по сравнению с массой велосипедиста, диаметром колеса и, наконец, давлением в шинах;

Таблица 3

Пройденное расстояние после преодоления препятствия

Тип велосипеда	Пройденное расстояние после преодоления препятствия, % при давлении в шинах					
	500 кПа			250 кПа		
	Масса велосипедиста, кг			Масса велосипедиста, кг		
	75	85	95	75	85	95
GT26	11%	13%	18%	20%	22%	29%
200D26	5%	9%	15%	13%	15%	21%
GT29	6%	6%	8%	8%	12%	17%
200D29	3%	4%	6%	5%	7%	9%

Примечание: GT — велосипед с одним амортизатором; 200D — велосипед с двумя амортизаторами.

- лучшая комбинация для поддержания импульса после преодоления препятствия — это высокое давление в шинах, низкая масса велосипедиста, подвеска с двумя амортизаторами и колесо диаметром 29 дюймов.

Библиографический список

1. Арабули Ю. Г. Использование в экспертной практике экспериментально-расчетных значений параметров торможения транспортных средств. М.: ВНИИСЭ, 1990. С. 142–145.
2. Евтюков С. А., Брылев И. С. Обзор существующих методик расчета скорости двухколесных транспортных средств // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: www.science-education.ru/113-10750
3. Евтюков С. А., Васильев Я. В. Реконструкция и экспертиза ДТП в примерах. СПб.: Петрополис, 2012. 323 с.
4. Евтюков С. А., Васильев Я. В. Экспертиза ДТП: методы и технологии. СПб.: СПбГАСУ, 2012. 310 с.
5. Криницын А. А. Применение нормативных значений параметров торможения транспортных средств в экспертной практике: метод. рекомендации. М.: ВНИИСЭ, 1987. С. 149–152.
6. Любовицкий В. П. Гонимые велосипеды. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 319 с.
7. Пучкин В. А. Основы экспертного анализа дорожно-транспортных происшествий: Базы данных. Экспертная техника. Методы решений. Ростов-на-Дону: ИИО ЮФУ, 2010. С. 181–192.
8. Bertucci W., Rogier S. Effects of different types of tyres and surfaces on the power output in the mountain bike field conditions: A preliminary study. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 15(Sup. 1): 2012, pp. 234–236.
9. Bertucci W., Rogier S., Reiser R. Evaluation of aerodynamic and rolling resistances in mountain-bike field conditions. Journal of Sports Sciences, 31(14): 2013, pp. 1606–1613.
10. Brown S. "Bicycle frame geometry." Hyperlink: [<http://sheldonbrown.com/index.html>].
11. Downs T. Bicycling: Illustrated bicycle maintenance for road and mountain bikes. London, UK: Rodale Inc 2005, p. 38.
12. Kurakina E., Evtyukov S. Results of studying road construction parameters condition. Architecture and Engineering. 2018. T. 3, № 1. С. 29–37.
13. Grant J. "Bicycle wheel components." Hyperlink: [<http://www.livestrong.com/article/82697-bicycle-wheel-components/>], 2010.

14. Huang J. Tech feature: The work of wheel energy. Hyperlink, 2012, p. 28.
15. Jackson R. L., Willis J. R., Arnold M. Synthesis of the effects of pavement properties on tire rolling resistance, AL: National Centre for Asphalt Technology, 2005, p. 13.
16. Rutman J. How to do a Roll-down Test. Hyperlink. 2007, p. 22.
17. Schwalbe S. Rolling resistance. Hyperlink, 2011. [URL:http://www.schwalbetyres.com/tech_info/rolling_resistance]
18. Sutherland H., Sutherland's handbook for bicycle mechanics (6th ed.). Berkeley, CA: Sutherland Publication, 1995, p. 58.
19. Takken T., Ribbink A., Heneweer H., Moolenaar H., Wittink H. Workload demand in police officers during mountain bike patrols. Ergonomics, 52(2): 2009, pp. 245–250.
20. Titlestad J., Fairlie-Clarke T., Whittaker A., Davie M., Watt I. Effect of suspension systems on the physiological and psychological responses to sub-maximal biking on simulated smooth and bumpy tracks // Journal of Sports Sciences, 24(2): 2006, pp. 125–135.

References

1. Arabuli Yu. G. *Ispol'zovanie v ekspertnoj praktike eksperimental'no-raschetnyh znachenij parametrov tormozheniya transportnyh sredstv: metod. Rekomendacii* [Using in experimental practice the test and calculated values of vehicle braking parameters: Method. Recommendations]. Moscow, VNIIE Publ., 1990, pp. 142–145.
2. Evtyukov S. A., Brylev I. S. *Obzorsushchestvuyushchih metodik rascheta skorosti dvuhkolesnyh transportnyh sredstv* [Review of existing methods for calculating the speed of two-wheeled vehicles]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 6. Available at: www.science-education.ru/113-10750
3. Evtyukov S. A., Vasil'ev Ya. V. *Rekonstrukciya i ekspertiza DTP v primerah* [Reconstruction and examination of road accidents in examples]. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2012, 323 p.
4. Evtyukov S. A., Vasil'ev Ya. V. *Ekspertiza DTP: metody i tekhnologii* [Road traffic accidents examination: methods and technologies]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2012, 310 p.
5. Krinitsyn A. A. *Primenenie normativnyh znachenij parametrov tormozheniya transportnyh sredstv v ekspertnoj praktike: Metod. Rekomendatsii* [Application of normative values of vehicle braking parameters in expert practice: Method. Recommendations]. Moscow, VNIIE Publ., 1987, pp. 149–152.
6. Lyubovitskiy V. P. *Gonochnye velosipedy* [Racing bicycles]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 319 p.

7. Puchkin V. A. *Osnovy ekspertnogo analiza dorozhno-transportnyh proissheshtvij: Bazy dannyh. Ekspertnaya tekhnika. Metody resheniy* [Bases of expert analysis of road accidents: Databases. Expert equipment. Method of solution]. Rostov-on-Don, YuFU Publ., 2010, pp. 181–192.
8. Bertucci W., Rogier S. Effects of different tyre types and surfaces on the power output in the mountain bike field conditions: Preliminary study. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 15(Sup1.), 2012, pp. 234–236.
9. Bertucci W., Rogier S., Reiser R. Evaluation of aerodynamic and rolling resistances in mountain-bike field conditions. *Journal of Sports Sciences*, 31(14), 2013, pp. 1606–1613.
10. Brown S. Bicycle frame geometry. Available at: <http://sheldonbrown.com/index.html>
11. Downs T. *Bicycling: Illustrated bicycle maintenance for road and mountain bikes*. London, UK: Rodale Inc 2005, p. 38.
12. Kurakina E., Evtyukov S. Results of studying road construction parameters condition. *Architecture and Engineering*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 29–37.
13. Grant J. Bicycle wheel components. *Hyperlink*. Available at: <http://www.livestrong.com/article/82697-bicycle-wheel-components>, 2010.
14. Huang J. Tech feature: The work of wheel energy. *Hyperlink*, 2012, p. 28.
15. Jackson R. L., Willis J. R., Arnold M. Synthesis of the effects of pavement properties on tire rolling resistance. AL: *National Centre for Asphalt Technology*, 2005, p. 13.
16. Rutman J. How to do a roll-down test. *Hyperlink*, 2007, p. 22.
17. Schwalbe S. Rolling resistance. *Hyperlink*. Available at: http://www.schwalbetyres.com/tech_info/rolling_resistance, 2011.
18. Sutherland H. *Sutherland's handbook for bicycle mechanics* (6-th ed.). Berkeley, CA, Sutherland Publ., 1995, p. 58.
19. Takken T, Ribbink A, Heneweer H, Moolenaar H, Wittink H. Workload demand in police officers during mountain bike patrols. *Ergonomics*, 52(2): 2009, pp. 245–250.
20. Titlestad J, Fairlie-Clarke T, Whittaker A, Davie M., Watt I. Effect of suspension systems on the physiological and psychological response to sub-maximal biking on simulated smooth and bumpy tracks. *Journal of Sports Sciences*, 24(2): 2006, pp. 125–135.