

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ КОЛЁС АВТОМОБИЛЯ

Клименко В. И.¹, Шуклинов С. Н.¹, Леонтьев Д. Н.¹, Губин А. В.¹
¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. В работе выполнен обзор методов определения коэффициента сопротивления качению, проведен анализ методов определения величины сопротивления качению в зависимости от скорости движения автомобиля, давления воздуха в шине, действия тормозного и тягового моментов. Даны рекомендации о выборе метода расчёта коэффициента сопротивления качению колёс автомобиля при начале движения транспортного средства на подъём.

Ключевые слова: сопротивление качению, коэффициент сопротивления качению, начало движения, подъём, автомобиль.

Введение

Известно, что сила сопротивления качению шины автомобильного колеса является непостоянной величиной, которая, в зависимости от сочетания множества факторов (конструктивных и эксплуатационных), а также от условий и режимов движения колеса может меняться в достаточно широком диапазоне. Так, например, уменьшение числа слоёв корда, толщины протектора шины и применение в шине синтетических материалов с малыми гистерезисными потерями способствует снижению сопротивления качению, а снижение давления в шине или увеличение скорости движения автомобиля – его увеличению.

Силу сопротивления качению при проведении научных исследований часто представляют в виде произведения коэффициента сопротивления качению f_k и нормальной реакции опорной поверхности R_z , возникающей в пятне контакта шины с поверхностью дорожного покрытия, что является удобным при выполнении имитационного моделирования сопротивления качению движущегося транспортного средства.

Очевидно, что выбор метода определения величины сопротивления качению при исследовании вопросов, связанных с началом движения транспортного средства на подъём, будет определять особенности процессов, протекающих в момент начала движения транспортного средства, поэтому выбор метода расчёта величины сопротивления качению должен быть обоснованным.

Анализ публикаций

Анализ научно-технической литературы [1–19] показал, что влияние различных фак-

торов на величину сопротивления качению автомобильного колеса не позволяет получить точную аналитическую зависимость, описывающую этот процесс. Поэтому в научных исследованиях большинство авторов [3–6, 9, 11–14, 16–18] определяют величину сопротивления качению автомобильного колеса на основе приближенных эмпирических зависимостей.

Анализ исследований, проведенных в работе [16], показал, что эмпирические зависимости дают различный результат при выполнении расчётов, поэтому вопрос выбора метода расчёта величины коэффициента сопротивления качению автомобильного колеса требует дополнительного исследования в части его применимости в задачах моделирования начала движения транспортного средства на подъёме.

Цель и постановка задачи

В работе ставится цель – определить рациональный метод расчёта коэффициента сопротивления качению автомобильного колеса на основе анализа различных методов и подходов определения коэффициента сопротивления качению колёс транспортного средства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ аналитических методов определения коэффициента сопротивления качению;
- выполнить анализ эмпирических методов определения коэффициента сопротивления качению;
- дать рекомендации в отношении применения метода расчёта величины сопротивления качению колёс автомобиля при его движении на подъёме.

Методы расчета коэффициента сопротивления качению колес автомобиля

В научных работах [1–3, 8–9] отмечается, что величина коэффициента сопротивления качению может быть определена из выражения вида

$$f_{к_0} = \frac{a}{r_d}, \quad (1)$$

где a – продольный снос реакции R_z , м; r_d – динамический радиус колеса, м.

В то же время в работах [11, 12] делаются уточнения, что в процессе качения колеса, кроме продольного сноса нормальной реакции R_z , наблюдается также смещение оси колеса (рис. 1) на величину c , поэтому при определении коэффициента сопротивления качению необходимо учитывать этот эффект, несмотря на то, что смещение c имеет небольшую величину.

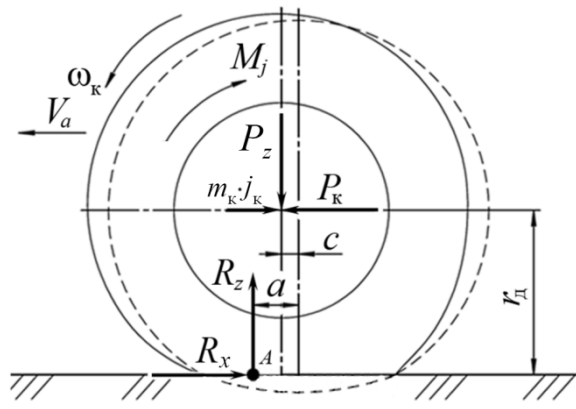


Рис. 1. Схема сил, действующих на ведомое колесо в общем случае (при разгоне): ω_k – угловая скорость вращения колеса, рад/с; V_a – скорость движения автомобиля, м/с; R_z – нормальная реакция опорной поверхности, Н; R_x – продольная реакция опорной поверхности, Н; P_z – нагрузка, действующая на колесо, Н; P_k – сила, толкающая колесо в направлении его качения, Н; M_j – инерционный момент колеса, Н·м; m_k – масса автомобильного колеса, кг; j_k – ускорение автомобильного колеса, м/с²

Если учесть смещение оси колеса, то зависимость (1) примет вид

$$f_{к_0} = \frac{a - c}{r_d} = \frac{\zeta}{r_d}, \quad (2)$$

где c – смещение оси колеса, м; ζ – плечо сопротивления качению, м.

В работе [8], при исследовании влияния крутящего момента M_k на величину сопротивления качению отмечается, что при переходе колеса из ведомого режима в ведущий, величина коэффициента сопротивления качению уменьшается, а затем снова возрастает с ростом скольжения, что также отмечается в работах [7, 13, 14].

В работе [8] предлагается в таком случае определять величину сопротивления качению из выражения

$$f_k = f_{к_0} - \frac{M_k}{R_z} \cdot \frac{r_k - r_d}{r_k \cdot r_d}, \quad (3)$$

где M_k – крутящий момент, подведенный к колесу, Н·м; r_k – радиус качения колеса, м.

Авторы работы [6] на основе элементарной работы сил сопротивления качению ведущих колес предложили для определения значения коэффициента сопротивления качению в тяговом режиме зависимость вида

$$f_{кв} = \frac{a_{шв}}{r_{дв}} + \frac{M_k}{R_{зв}} \cdot \left(\frac{r_{дв} - r_{кв}}{r_{дв} \cdot r_{кв}} \right) + \frac{G_a \cdot \sin \alpha - F_{ш}}{R_{зв}}, \quad (4)$$

где $a_{шв}$ – смещение реакции $R_{зв}$ на ведущем колесе транспортного средства, м; $r_{дв}$ – динамический радиус ведущего колеса транспортного средства, м; $r_{кв}$ – кинематический радиус качения ведущего колеса транспортного средства, м; $R_{зв}$ – нормальная составляющая реакции дороги на ведущем колесе, Н; G_a – вес транспортного средства; $F_{ш}$ – продольная упругая сила шин заторможенных ведомых колес, Н; α – угол уклона поверхности дорожного покрытия.

Как отмечают авторы работы [6], предложенная ими зависимость (4) справедлива при условии, что автомобиль удерживается на подъеме в заторможенном состоянии только при помощи неведущих колес.

Авторы работы [6] подчеркивают, что сопротивление качению ведущего автомобильного колеса в момент начала движения транспортного средства на подъем определяется из уравнения (4) только для ведущих не заторможенных колес, о чем свидетельствует индекс «в» в обозначении некоторых величин, входящих в уравнение.

Анализ работ [5, 13, 14] показал, что при подведении тормозного момента также наблюдается изменение величины коэффициента сопротивления качению, причём, как отмечают авторы этих работ, с увеличением тормозного момента коэффициент сопротивления качению возрастает. В работе [5] для определения величины коэффициента сопротивления качению при наличии тормозного момента предложено использовать зависимость (5), которая учитывает не только влияние тормозного момента на величину сопротивления качению колеса, но и учитывает скольжение элементов протектора шины в пятне контакта шины относительно поверхности дорожного покрытия

$$f_k = \frac{(M_T + P_z \cdot \zeta) \cdot r_k^2 \cdot \omega_k}{(I_k \cdot g + P_z \cdot r_k \cdot r_d) \cdot V_a}, \quad (5)$$

где M_T – тормозной момент, Н·м; I_k – момент инерции колеса, кг·м²; g – ускорение свободного падения, м/с².

Авторы работы [5] акцентируют внимание на том, что при качении колеса в условиях, когда $M_T = 0$ и $r_k \cdot \omega_k \cong V_a$, коэффициент сопротивления качению имеет минимальное значение.

Анализ эмпирических методов [3, 4, 9–11] определения коэффициента сопротивления качению показал, что они основаны на аппроксимации экспериментальных данных, полученных при взаимодействии шин, установленных на колеса автомобиля, в условиях отсутствия тормозного или тягового момента. В общем случае уравнение аппроксимации имеет вид

$$f_k = f_{k_0} + f_{k_0} \cdot A \cdot V_a^2, \quad (6)$$

где A – коэффициент аппроксимации (принимается из диапазона $2,7 \cdot 10^{-6} \dots 2,7 \cdot 10^{-5}$, соответственно для дорог $f_{k_0} = 0,01 \dots 0,02$);

Как показал анализ работ [3, 4, 9–11], вторая степень аппроксимации является достаточной для описания характера изменения величины коэффициента сопротивления качению при движении автомобиля с высокими скоростями, хотя в некоторых работах [11, 15] предлагается и более высокий порядок аппроксимации, например:

$$f_k = f_{k_0} (1 + 10^{-3} \cdot V_a^2 + 4 \cdot 10^{-12} \cdot V_a^4), \quad (7)$$

$$f_k = \frac{0,004}{\sqrt[3]{p_{ш}^2}} + \frac{6 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{p_{ш}}} \cdot V_a^2 + \frac{4,07 \cdot 10^{-10}}{\sqrt[3]{p_{ш}^4}} \cdot V_a^3, \quad (8)$$

где $p_{ш}$ – давление воздуха в шине, МПа.

Следует отметить, что в работе [9] при рассмотрении взаимодействия шины с поверхностью дорожного покрытия на малых скоростях, в ведомом режиме, предложена эмпирическая зависимость вида

$$f_{k_0} = (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot G_k^2) \cdot (10 + p_{ш}), \quad (9)$$

где α_1 и α_2 – эмпирические коэффициенты, которые зависят от конструктивных и геометрических параметров шины [9].

Анализ зависимости (9) показал, что она позволяет скорректировать, в зависимости от давления воздуха в шине, значение величины сопротивления качению в уравнениях (6), (7).

Анализ работы [3] показал, что на основе уравнения аппроксимации (6) автором работы [3] предложена зависимость (10), позволяющая оценить влияние особенностей конструкции ходовой части автомобиля и ровности дорожного покрытия на величину коэффициента сопротивления качению при допущении, что f_{k_0} имеет минимальное значение, равное 0,01.

$$f_k = f_{k_0} + 3,6^2 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda_n \cdot S \cdot V_a^2, \quad (10)$$

где λ_n – коэффициент, зависящий от конструкции ходовой части автомобиля (для легковых автомобилей $\lambda_n = 4$, а для автомобилей повышенной грузоподъёмности $\lambda_n = 5,5$); S – показатель ровности дорожного покрытия (определяется экспериментальным путем), см/км.

Экспериментальные исследования, проведенные в работе [3], показали, что среднее значение показателя ровности дорожного покрытия для асфальтобетонного шоссе в отличном состоянии находится в диапазоне от 50 до 75 см/км. Для дорог, находящихся в плохом состоянии, этот параметр может превышать 300 см/км.

При моделировании движения транспортных средств с шинами диагональной или радиальной конструкции удобно использовать универсальную эмпирическую зависимость (11) Клауэ и Клоя [15, 16]. Автор работы [19] отмечает, что уравнение (11) может быть

представлено в общем виде, как и уравнение (12).

Как показал анализ работы [19], уравнение (12) рекомендовано для использования стандартом SAE [17] в качестве зависимости, дающей наиболее точное решение при определении величины коэффициента сопротивления качению шин автомобильных колёс всех типов наземных колёсных транспортных средств.

$$f_k = \frac{K}{10^3} \left(5,1 + \frac{5,5 \cdot 10^5 + 90 \cdot R_z}{10^6 \cdot p_{ш}} + \frac{1,1 \cdot 10^3 + 0,0388 \cdot R_z \cdot V_a^2}{10^6 \cdot p_{ш}} \right), \quad (11)$$

$$f_k = p_{ш}^{\beta_1} \cdot R_z^{\beta_2} \cdot (a_1 + b_1 \cdot V_a + c_1 \cdot V_a^2), \quad (12)$$

где K – коэффициент, который принимается для радиальных пневматических шин равным 0,8, а для других шин равным 1,0 [16]; β_1 – коэффициент, который принимается для легковых автомобилей 0,4, а для тяжелой техники 0,2 [18]; β_2 – коэффициент, который принимается для легковых автомобилей 0,85, а для тяжелой техники 0,9 [18]; a_1 , b_1 , c_1 – постоянные эмпирические коэффициенты, которые определяют характер изменения величины сопротивления качению автомобильного колеса в зависимости от скорости движения транспортного средства [17].

Таким образом, проведенный анализ методов определения коэффициента сопротивления качению шин автомобильных колёс показал, что уравнения (1), (2) и (9) отражают физическую сущность величины сопротивления качению колеса автомобиля в ведомом режиме при условии его прямолинейного движения в горизонтальной плоскости дороги. Указанные выше зависимости не могут быть в чистом виде использованы при описании процессов, связанных с началом движения транспортного средства на подъём.

Анализ зависимостей (6)–(8), (10)–(12), показал, что они могут быть применимы только для моделирования движения автомобиля с высокими скоростями в горизонтальной плоскости дороги и не могут быть применены в моделях начала движения автомобиля на подъём, поскольку не учитывают характер изменения величины сопротивления качению вследствие действия скатывающей силы, действующей на автомобиль, стоящий на уклоне.

Зависимость, предложенная в работе [5] для определения величины сопротивления качению, не может быть применена в моделях начала движения автомобиля на подъём, так как зависимость (5) применима в режиме торможения, а не в режиме разгона.

Метод определения величины коэффициента сопротивления качению автомобильного колеса, описанный в работе [8], позволяет учесть влияние тягового момента на величину сопротивления качению автомобильного колеса, но следует отметить, что зависимость (3) не учитывает деформацию шин заторможенных неведущих колес стоящего автомобиля на уклоне в момент начала его движения, поэтому её использование в моделях начала движения автомобиля является ограниченным.

Анализ зависимости (5), предложенной в работе [6], учитывает деформацию шин заторможенных неведущих колес транспортного средства, стоящего на уклоне, поэтому данная зависимость наиболее приемлема в модели сопротивления качению автомобильного колеса при моделировании начала движения автомобиля на подъём.

Выводы

Проведенное исследование показало, что не каждый метод расчёта коэффициента сопротивления качению может быть применим при моделировании момента начала движения колесного транспортного средства на подъёме.

Эмпирические зависимости (6)–(8), (10)–(12) для расчёта коэффициента сопротивления качению являются функциями скорости движения автомобиля и не позволяют выполнить моделирование момента начала движения транспортного средства на подъёме. Кроме того, они не учитывают различия между ведущими и ведомыми режимами движения колёс автомобиля.

Зависимости (1), (2), (9) для определения коэффициента сопротивления качению автомобильного колеса в ведомом режиме качения могут быть использованы при моделировании начала движения колёсного транспортного средства на подъём только после растормаживания неведущих колес.

Зависимость (5) не может быть применима для моделирования процесса начала движения транспортного средства, так как режим движения, при котором определяется коэффициент сопротивления качению, не соответствует режиму движения колеса ав-

томобиля в момент начала его движения на подъём.

Зависимость (3) для определения величины коэффициента сопротивления качению в ведущем режиме позволяет учесть влияние тягового момента на величину сопротивления качению автомобильного колеса, но даёт существенные ошибки при моделировании момента начала движения автомобильного колеса, поскольку не учитывает деформацию шин заторможенных неведущих колес стоящего автомобиля на уклоне в момент начала его движения.

Зависимость (4) для определения коэффициента сопротивления качению применима для моделирования процесса начала движения колесного транспортного средства на подъём при условии, если автомобиль удерживается на уклоне в неподвижном состоянии только неведущими заторможенными колесами.

Литература

- Гришкевич А. И. Автомобили. Теория: учебник для вузов. Минск, Высшая школа, 1986. 208 с.
- Литвинов А. С., Фаробин Я. Е. АВТОМОБИЛЬ. Теория эксплуатационных свойств. *Машиностроение*. Москва, 1989. 240 с.
- Бирюла А. К. Проектирование автомобильных дорог. *Дориздат*. Москва, 1948. 347 с.
- Иванкина О. П., Лебедев Б. С. К вопросу об определении коэффициента сопротивления качению. *Научный журнал Novainfo.ru*. Грязовец, 2015. Вып. 33 (2). С. 57–59.
- Зотов В. М. Определение коэффициента сопротивления качению автомобильного колеса, движущегося в режиме торможения. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. Волгоград, 2013. Вып. 1 (29). С. 190-195.
- Шуклинов С. Н., Вербицкий В. И., Ужва А. В., Губин А. В. Моделирование коэффициента сопротивления качению при трогании автомобиля с места. *Материалы Международной научно-практической конференции*. Харьков, 2019. Т.1. С.120–124.
- Гудков В. В., Сокол П. А. Процессы взаимодействия автомобильных шин с опорной поверхностью. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. Воронеж, 2012. Вып. 2 (44). С. 88–91.
- Чудаков Е. А. Теория автомобиля. *Машигиз*. Москва, 1950. 344с.
- Петрушов В. А. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В. А. Петрушов, С. А. Шуклин, В. В. Московкин. *Машиностроение*. Москва, 1975. - 224 с.
- Бекман В. В. Гоночные автомобили. *Машиностроение*. Ленинград, 1967. 284 с.
- Гашук П. Автомобиль. Теория колёсного рушья. *Кондор*. Київ, 2018. 328 с.
- Антонов А. С. Кононович Ю. А., Магидович Е. И., Прозоров В. С. Армейские автомобили: Теория. *Воениздат*. Москва, 1970. 192 с.
- Работа автомобильной шины / [В. И. Кнороз, Е. В. Кленников, И. П. Петров и др.]; под ред. В. И. Кнороза. *Транспорт*. Москва, 1976. 238 с.
- Wong J. Y. Theory of ground vehicles. – 3rd ed / J. Y. Wong // *Carleton University Ottawa*. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 528 p.
- Ефремов И. С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчет). 3-е изд., испр. и доп. Учебник для вузов. *Высш. Школа*. Москва, 1969. 488 с.
- Pauwelussen J., Dalhuijsen W., Merts M. Tyre dynamics, tyre as a vehicle component Part 3.: Rolling resistance. *Virtual Education in Rubber Technology (VERT)*, FI-04-B-F-PP-160531, HAN University, 2007, 1-50.
- SAE J2452_201707. Stepwise Coastdown Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance.
- The Tyre. Rolling resistance and fuel savings / Michelin Technology Society. – France : Clermont-Ferrand, 2003. 120.
- Wen B., Rogerson G., Hartke A., "Correlation Analysis of Rolling Resistance Test Results from SAE J1269 and J2452," *SAE Technical Paper* 2014-01-0066, 2014, <https://doi.org/10.4271/2014-01-0066>.

References

- Grishkevich A. I. (1986) Avtomobili. Teorija: Uchebnik dlja vuzov [Cars: Theory. Textbook for higher schools]. *Vysshaja shkola*. Minsk. Book. [in Russian].
- Litvinov A. S., Farobin Ja. E. (1989) Avtomobil. Teorija jekspluatacionnyh svojstv [Car. Theory of operation features]. *Mashinostroenie*. Moskva. Book. [in Russian].
- Birulja A. K. (1948) Proektirovanie avtomobil'nyh dorog [Moto roads designing]. *Dorizdat*. Moskva. Book. [in Russian].
- Ivankina O. P., Lebedev B. S. (2015) K voprosu ob opredelenii kojefficienta soprotivlenija kacheniju [On the problem of determining rolling resistance coefficient]. *Nauchnyj zhurnal Novainfo.ru*. Grjzovetc. 33. 57–59 [in Russian].
- Zotov V. M. (2013) Opredelenie kojefficienta soprotivlenija kacheniju avtomobil'nogo kolaesa, dvizhushhegosja v rezhime tormozhenija. [Determination of coefficient of rolling resistance for a car wheel moving in braking mode]. *Izvestija Nizhnevolzhsogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 1 (29). 190-195 [in Russian].
- Shuklinov S. N., Verbickij V. I., Uzhva A. V., Gubin A. V. (2019) Modelirovanie kojefficienta soprotivlenija kacheniju pri troganii avtomobilja s

- mesta [Modeling rolling resistance coefficient at the start]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Kharkov. 1. 120–124 [in Russian].
7. Gudkov V. V., Sokol P. A. (2012) Processy vzaimo-dejstvija avtomobil'nyh shin s opornoj poverhnost'ju [Processes of car tires interaction with the bearing surface]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. Voronezh. 2 (44). 88–91 [in Russian].
 8. Chudakov E. A. (1950) Teorija avtomobilja. [Theory of cars]. *Mashgiz*. Moskva. Book. [in Russian].
 9. Petrushov V.A. i dr. (1975) Soprotivlenie kacheniju avtomobilej i avtopoezdov [Rolling resistance of cars and motor trains]. *Mashinostroenie*. Moskva. Book. [in Russian].
 10. Bekman V. V. (1967) Gonochnye avtomobili [Racing cars]. *Mashinostroenie*, Leningrad [in Russian].
 11. Gashuk P. (2018) Avtomobil. Teoriya kolisnogo rushiya [Car. Theory of Wheel Propulsion]. *Kondor*. Kiyiv. [in Ukraine].
 12. Antonov A. S., Kononovich Yu. A., Magidovich E. I., Prozorov V. S. (1970) Armejskie avtomobili: Teoriya [Army vehicles: Theory]. *Voenizdat*. Moskva. [in Russian].
 13. Knoroz V. I., Klennikov E. V., Petrov I. P. i dr. (1976) Rabota avtomobilnoj shiny [How car tire works]. *Transport*. Moskva. [in Russian].
 14. Wong J. Y. (2001) Theory of ground vehicles. Canada, Carleton University Ottawa.
 15. Efremov I. S. (1969) Trolleybusy (teoriya, konstrukciya i raschet): Uchebnyk dlya vuzov [Trolleybuses (theory, design and calculation)]. *Vysshaya shkola*. Moskva. [in Russian].
 16. Pauwelussen J., Dalhuijsen W., Merts M. (2007) Tyre dynamics, tyre as a vehicle component. Rolling resistance. *Virtual Education in Rubber Technology (VERT)*, HAN University.
 17. SAE J2452_201707. Stepwise Coastdown Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance.
 18. Michelin Technology Society. (2003) The Tyre. Rolling resistance and fuel savings. France, Clermont-Ferrand.
 19. Wen B., Rogerson G., Hartke A., (2014) Correlation Analysis of Rolling Resistance Test Results from SAE J1269 and J2452, *SAE Technical Paper* 2014-01-0066, <https://doi.org/10.4271/2014-01-0066>.

Клименко Валерий Иванович¹, доктор технических наук, заведующий кафедрой автомобилей им. А.Б. Гредескула, (057) 700-38-77, valeriy.klimenko@gmail.com

Шуклинов Сергей Николаевич¹, доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей им. А. Б. Гредескула, (066) 398-40-77, schuklinovsn@gmail.com.

Леонтьев Дмитрий Николаевич¹, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей им. А. Б. Гредескула, (097) 943-78-85, dima.a3alij@gmail.com,

Губин Антон Владимирович¹, аспирант каф. автомобилей им. А.Б. Гредескула, тел. (093) 331-12-84, Anton-345@ukr.net

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ), 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

Analysing the methods for determining coefficient of resistance to car wheels rolling

Abstract. Problem. *When simulating the operation of automatic or automated driver assistance systems, it is necessary to take into account the rolling resistance of the car wheels the moment the car begins to move on a slope, which necessitates the choice of a method for calculating the value of the coefficient of rolling resistance of the car wheels. Goal.* The aim of the work is to determine a rational method for calculating the coefficient of rolling resistance of a car wheel based on the analysis of methods and approaches in relation to determining the coefficient of rolling resistance of car wheels. **Methodology.** *The work was performed by the method of generalizing information using the method of analytical comparison and includes the analysis of information from various network resources, standards, scientific libraries and open bibliographic special sources. Results.* The main result of this work is the conclusion that not every method of calculating the coefficient of rolling resistance is applicable when modeling the start of movement of a wheeled vehicle on the rise. Based on the analysis of methods for calculating the rolling resistance coefficient of a car wheel, recommendations are given on choosing the most rational method for modeling the start of a car standing on a mountainside. **Scientific novelty.** Prerequisites have been formed for further research related to modeling a wheeled vehicle upgrading. The analyzed information from open scientific sources indicates that the chosen direction is covered quite widely in the specialized technical literature, but requires additional research in connection with the peculiarities of the work processes that occur the moment the car is standing on the side of the mountain. **Practical significance.** The results of the study can be used to expand theoretical information, which is a component of the course on car theory in teaching undergraduate and graduate students in the field of the automotive industry. The materials of the work can also be used to form mathematical models related to the description of rolling resistance of car wheels tires.

Key words: rolling resistance, coefficient of rolling resistance, start of movement, upgrade, vehicle.

Klimenko Valery¹, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automobiles named after A.B. Gredeskula, (057) 700-38-77, valeriy.klimenko@gmail.com

Shuklinov Serhii¹, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles named after A.B. Gredeskula, (066) 398-40-77, schuklinovsn@gmail.com.

Leontiev Dmytro, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles named after A.B. Gredeskul, (097) 943-78-85, dima.a3alij@gmail.com.

Gubin Anton¹, PhD student, tel. (093) 331-12-84, Anton-345@ukr.net

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 61002, Ukraine, Kharkiv, str. Yaroslava Mudrogo 25.

Анализ методов определения коэффициента сопротивления качению колёс автомобиля

Анотація. Під час дослідження робочих процесів автоматичних або автоматизованих систем, які допомагають водієві зрушити транспортний засіб з місця, особливо на підйомі, необхідно врахувати сили опору коченню його коліс, але, як показав аналіз науково-технічної літератури, це питання не є однозначним і вимагає проведення аналізу методів розрахунку величин коефіцієнтів опору коченню автомобільних коліс, на основі якого стало можливим обрання методу розрахунку, який дозволяє виконати якісне моделювання моменту початку руху транспортного засобу з місця на підйомі. Метою роботи є визначення раціонального методу розрахунку коефіцієнта опору коченню автомобільного колеса на основі аналізу різних методів та підходів щодо визначення коефіцієнта опору коченню коліс автомобіля. Під час дослідження були проаналізовані аналітичні та емпіричні методи визначення коефіцієнта опору коченню та зроблені висновки щодо можливості використання окремих методів під час дослідження робочих процесів авто-

мобільного колеса, пов'язаних із початком руху транспортного засобу на підйом. Результати цієї роботи можуть бути використані для розширення інформативної складової курсів навчання студентів та аспірантів за автомобільними спеціальностями, оскільки стаття носить оглядовий характер. Матеріали публікації можуть бути також використані для подальшого узагальнення та систематизації інформації з цього питання, враховуючи безперервний розвиток і вдосконалення теоретичних питань з теорії автомобіля і методів розрахунку, необхідних для проектування сучасних автоматичних або автоматизованих систем, які керують процесом початку руху транспортного засобу, в тому числі й на підйомі.

Ключові слова: опір коченню, коефіцієнт опору коченню, початок руху, підйом, автомобіль.

Клименко Валерій Іванович¹, доктор технічних наук, завідувач кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, (057) 700-38-77, valeriy.klimenko@gmail.com

Шуклінов Сергій Миколайович¹, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула, (066) 398-40-77, schuklinovsn@gmail.com.

Леонтєв Дмитро Миколайович¹, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула, (097) 943-78-85, dima.a3alij@gmail.com.

Губін Антон Володимирович¹, аспірант каф. автомобілів ім. А. Б. Гредескула, (093)-331-12-84, Anton-345@ukr.net

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.