

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТОРМОЗНОГО ПУТИ КОЛЁСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Балакина Е.В., Денисенко И.К., Салем А.Э.М.Э.

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград,
Россия*

Ключевые слова: транспортное средство, деформируемое колесо, коэффициент сцепления, боковая сила, тормозной путь, методика расчета.

Аннотация. Разработана уточненная расчетная методика для корректного определения тормозного пути колёсного транспортного средства, отличающаяся от известных учётом влияния боковой силы на коэффициент сцепления между деформируемым колесом транспортного средства и твердой опорной поверхностью. Методика основана на моделировании явления изменения формы ϕ - s -диаграммы при криволинейном движении транспортного средства. Получены новые формулы для определения тормозного пути автомобиля при разных внешних условиях по времени появления боковой силы колеса.

DEVELOPMENT OF A METHODIC FOR CALCULATING THE BRAKING DISTANCE OF A WHEELED VEHICLE

Balakina E.V., Denisenko I.K., Salem A.E.M.E.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Keywords: vehicle, deformable wheel, coefficient of adhesion, lateral force, braking distance, calculation method.

Abstract. A refined calculation method has been developed for the correct determination of the braking distance of a wheeled vehicle, which differs from the known ones by taking into account the influence of lateral force on the coefficient of adhesion between the deformable wheel of the vehicle and a solid support surface. The methodology is based on modeling the phenomenon of shape changes in the ϕ - s diagram during the curved movement of a vehicle. New formulas have been obtained for determining the braking distance of a car under different external conditions based on the time of occurrence of the lateral force of the wheel.

Тормозные свойства автомобиля относятся к свойствам активной безопасности – способности конструкции автомобиля снижать вероятность возникновения дорожно-транспортного происшествия (ДТП) [1, 2]. При наступлении события ДТП часто встает вопрос определения тормозного пути или начальной скорости торможения автомобиля. Для ответа на первый вопрос в настоящее время при автомобильных экспертизах тормозной путь S_b определяется по рекомендуемой [3] упрощенной зависимости:

$$S_b = \frac{v_a^2}{2g \cdot \phi_x}, \quad (1)$$

где v_a – скорость автомобиля (в м/с); ϕ_x – коэффициент сцепления в продольном направлении; g – ускорение свободного падения.

При этом коэффициент сцепления не рассчитывается, а выбирается с использованием нормативной таблицы [3]. В этой таблице приведены числовые значения коэффициента сцепления шины для разных видов и состояний опорной поверхности. Т.к. они получены при юзе колеса, то, по сути, представляют собой величины соответствующих коэффициентов трения скольжения. Однако, в зависимости от продольного скольжения в контакте колеса с опорной поверхностью, коэффициент сцепления может существенно превышать коэффициент трения скольжения (особенно при отсутствии боковой силы) [4-9]. Наличие на автомобиле автоматизированной системы управления торможением исключает блокирование колеса для обеспечения высокого значения коэффициента сцепления, которое поддерживается приблизительно постоянным и на 30% превышающим величину коэффициента трения скольжения (при отсутствии боковой силы).

Кроме того, существующая методика [3] не учитывает существенное влияние боковой силы на величину коэффициента сцепления. При больших боковых силах, приближенных по величине к предельным по условиям начала бокового скольжения колеса, коэффициент сцепления в продольном направлении может снижаться до нуля. При этом постоянная боковая сила может появиться по разным причинам: наличие бокового уклона дороги, сильного бокового ветра и так далее. Но самой большой по величине является переменная боковая сила, зависящая от скорости при криволинейном движении. Она обычно имеет центробежное происхождение при выполнении автомобилем маневров поворота или смены полосы движения и может достигать величины его веса.

Целью данного исследования является разработка методики расчёта тормозного пути автомобиля, отличающейся от известной учетом влияния боковой силы колеса на коэффициент сцепления в продольном направлении при заданном продольном скольжении в контакте.

Рассмотрена задача определения пути автомобиля при торможении с заданной начальной скоростью. В формуле (1) коэффициент сцепления φ_x можно рассчитать по методике, основанной на безразмерном параметре ОКПП (относительном коэффициенте предельно реализованного трения покоя). Для нахождения ОКПП использована улучшенная методика, описывающая его гладкой непрерывной функцией [2].

Согласно этой методике, коэффициент сцепления в продольном направлении

$$\varphi_x = f_{sl} \cdot s_x + \text{ОКПП} \cdot \sqrt{f_{st}^2 - \varphi_y^2}, \quad (2)$$

где f_{sl} – коэффициент трения скольжения; s_x – продольное скольжение колеса; ОКПП (*RCLRSF*) – относительный коэффициент предельного реализованного трения покоя (relative coefficient of limiting realized static friction); f_{st} – коэффициент трения покоя; φ_y – коэффициент сцепления в поперечном направлении.

ОКПРП можно рассчитать по полученной ранее авторами расчетно-экспериментальной зависимости [4] следующим образом:

$$\text{ОКПРП} = \frac{s_x \cdot (1 - s_x)}{a \cdot s_x^2 + b \cdot s_x + c}, \quad (3)$$

где a, b, c – известные константы. $a = 0,4; b = 0,8; c = 0,02$.

Вторая составляющая в формуле (2) зависит от очередности появления на колесе тормозного момента и боковой силы. При появлении боковой силы раньше момента на колесе

$$\varphi_y = P_y / P_z, \quad (4)$$

где P_z – нормальная нагрузка колеса; P_y – боковая сила колеса.

Если тормозной момент на колесе появился раньше боковой силы, то

$$\varphi_y = P_y / [P_z (1 - s_x)]. \quad (5)$$

Преимуществом предлагаемой методики является то, что она не только учитывает влияние боковой силы на величину коэффициента сцепления в продольном направлении, но и очередность её появления с тормозным моментом, а также то, что для использования данной методики не нужна первичная (нулевая) $\varphi_x - s_x$ -диаграмма. В результате математических преобразований получены две искомые формулы для двух случаев очередности появления боковой силы и тормозного момента на колесе:

$$s_b = \frac{v_a^2}{2g \cdot \left(f_{sl} \cdot s_x + \sqrt{f_{st}^2 - \left(\frac{v_a^2}{g \cdot r_t} \right)^2} \cdot \text{ОКПРП} \right)}; \quad (6)$$

$$s_b = \frac{v_a^2}{2g \cdot \left(f_{sl} \cdot s_x + \sqrt{f_{st}^2 - \left(\frac{v_a^2}{g \cdot r_t (1 - s_x)} \right)^2} \cdot \text{ОКПРП} \right)}. \quad (7)$$

Формула (6) относится к случаю, когда боковая сила была раньше тормозного момента на колесе. Соответственно, формула (7) – для случая, когда боковая сила появилась позже тормозного момента. Скорость автомобиля и радиус поворота кривой дороги в плане можно определить на месте ДТП или по видеоматериалам. Оттуда же можно предположить и очередность появления боковой силы и тормозного момента. Влияние боковой силы на расчётное значение тормозного пути автомобиля достаточно велико и поэтому его важно учитывать. Расчёт без влияния боковой силы приводит к появлению некорректных результатов и недостоверной оценке виновности при ДТП.

Достоинством данной методики является относительная простота её применения. Для использования формул (6), (7) не нужно проводить дополнительные эксперименты. Одна часть необходимых исходных данных

является справочными материалами (коэффициенты трения покоя и трения скольжения), другая часть определяется на месте ДТП прямым измерением (радиус поворота кривой дороги) или косвенно по видеоматериалам. Разработанная методика может найти применение в автомобильных экспертизах при оценке тормозного пути автомобиля, преимущественно при криволинейном движении.

Список литературы

1. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
2. Reza N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Application. – Springer Science + Business Media, 2008. – 1015 p.
3. ГОСТ 33997-2016 Колёсные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки. – М.: Стандартиформ, 2016. – 71 с.
4. Балакина Е.В., Денисенко И.К. Расчет ϕx - $s x$ -диаграммы // Автомобильная промышленность. – 2023. – №5. – С. 19-22.
5. Балакина Е.В. Универсальные зависимости параметров фрикционного взаимодействия в опорном контакте упругого колеса // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, №2. – С. 122-134. – DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134.
6. Балакина Е.В., Сарбаев Д.С., Денисенко И.К. Уточнение критического значения коэффициента продольного скольжения колеса по результатам современных исследований // Грузовик. – 2023. – №11. – С. 18-22. – DOI: 10.36652/1684-1298-2023-11-18-22.
7. Балабин И.В., Чабунин И.С. Колеса и шины для мобильных машин. – М.: ООО "Издательство "Спутник+", 2019. – 948 с.
8. Федотов А.И., Яньков О.С., Потапов А.С., Портнягин Е.М. Контроль систем безопасности автомобилей на стендах с беговыми барабанами – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – 364 с.
9. Федотов А.И. Испытания шин колесных транспортных средств. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2024. – 158 с.
10. Балакина Е.В., Сергиенко И.В., Двигат Д.М.М. Экспериментальное исследование относительной длины пятна контакта шин для легковых автомобилей // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2026. – № 1(54). – С. 106-112 – DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-106-112.

References

1. Tarasik V.P. Theory of car movement. – 2nd edition, revised and expanded. – SPb.: BHV-Petersburg, 2022. – 576 p.
2. Reza N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Application. – Springer Science + Business Media, 2008. – 1015 p.
3. GOST 33997-2016 Wheeled vehicles. Operational safety requirements and verification methods. – M.: Standartinform, 2016. – 71 p.
4. Balakina E.V., Denisenko I.K. Calculation of the ϕx - $s x$ -diagram // Automotive industry. 2023, no. 5, pp. 19-22.

5. Balakina E.V. Universal dependences of the parameters of frictional interaction in the support contact of an elastic wheel // Friction and wear. 2023, vol. 44, no. 2, pp. 122-134. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134.
6. Balakina E.V., Sarbaev D.S., Denisenko I.K. Clarification of the critical value of the coefficient of longitudinal sliding of the wheel based on the results of modern research // Truck. 2023, no. 11, pp. 18-22. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-11-18-22.
7. Balabin I.V., Chabunin I.S. Wheels and tires for mobile cars. – M.: Sputnik+ Publishing House, 2019. – 948 p.
8. Fedotov A.I., Yankov O.S., Potapov A.S., Portnyagin E.M. Control of car safety systems on stands with running drums. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2021. – 364 p.
9. Fedotov A.I. Tire testing of wheeled vehicles. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2024. – 158 p.
10. Balakina E.V., Sergienko I.V., Dvikat D.M.M. Experimental study of the relative length of the tire contact spot for passenger cars // Energy and resource conservation: industry and transport. 2026, no. 1(54), pp. 106-112 DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-106-112.

Балакина Екатерина Викторовна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей"	Balakina Ekaterina Viktorovna – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department "Technical exploitation and repair of cars"
Денисенко Илья Константинович – аспирант	Denisenko Ilya Konstantinovich – postgraduate student
Салем Абделрахман Э.М.Э – магистрант	Salem Abdelrahman E.M.E – master's student
i.k.denisenko@yandex.ru	

Received 25.04.2026