

УДК 656.13.052

Н. П. Кузнецов, доктор технических наук, профессор
С. А. Рассохин, аспирант
Ижевский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ ШИНЫ АВТОМОБИЛЯ С ПОЛОТНОМ ДОРОГИ НА МЕСТЕ ДТП

Излагаются аналитическое представление и экспериментальные методы определения значения коэффициента сцепления шины с полотном дороги. Рассматриваются пути повышения объективности полученного значения коэффициента сцепления для конкретного автомобильного колеса.

Быстрый рост автомобильного парка нашей страны и недостаточное количество мер, принимаемых по повышению пропускной способности улично-дорожной сети городов, ведет к увеличению дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Наиболее часто встречающийся параметр, который необходимо определить эксперту-автотехнику при установлении причинно-следственной связи ДТП, – начальная скорость автомобиля до начала торможения. Основным фактором, влияющим на определение начальной скорости автомобиля по следам торможения, является значение коэффициента сцепления шины колеса автомобиля – участника ДТП с полотном дороги.

Коэффициент сцепления φ – отношение силы трения покоя к нормальной составляющей внешних сил, действующих на поверхности тела (ГОСТ 16429 – 70) или отношение максимальной реакции T_{\max} в зоне контакта к нормальной реакции N , действующей на колесо:

$$\varphi = \frac{T_{\max}}{N} = \frac{M_{\varphi}}{r_d N},$$

где M_{φ} – момент по сцеплению колеса с дорогой; r_d – динамический радиус (расстояние от оси колеса до горизонтальной плоскости, проходящей через равнодействующую касательных реакций в зоне контакта).

Коэффициент сцепления пневматического колеса с опорной поверхностью зависит от материала и состояния трущихся поверхностей, а также от скорости движения экипажа, скорости скольжения колеса, характера привода оси и характеристики подвески.

Для вычисления коэффициента сцепления необходимо знать силу трения покоя между шиной и дорогой, а также нагрузку на шину. В данном случае сила трения покоя зависит от характеристик шероховатости и волнистости поверхности дороги, ее состояния (тип покрытия, загрязненность, влажность и т. п.), физико-механических характеристик материала протектора (модуль упругости, коэффициент гистерезисных потерь в резине) и его рисунка, а также от конструкции шины.

При движении на колесо автомобиля действуют следующие силы и моменты: G_k – радиальная нагрузка; P_k – сила тяги, приложенная к оси колеса; X – горизонтальная реакция в плоскости дороги; Z – вертикальная реакция; M_k – крутящий момент. Кроме того, шина нагружена силами от внутреннего давления.

Под действием приложенных внешних и внутренних сил и моментов происходит деформация шины. Реальная нагрузка приводит к прогибу шины и возникновению площади контакта шины с дорогой – контурной площади контакта.

Величину прогиба определяют из уравнения [1]

$$h^2 - \alpha_2 \frac{h G_k}{P_w + P_0} - \alpha_1 G_k = 0, \quad (1)$$

где h – величина прогиба; p_w – внутреннее давление воздуха в шине; p_0 – характеристика собственной жесткости оболочки шины; α_1 – постоянная величина (для шин грузовых автомобилей $\alpha_1 \approx 0,0022 \text{ см}^2/\text{кгс}$, для легковых $\alpha_1 \approx 0,0037 \text{ см}^2/\text{кгс}$);

$\alpha_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{r_0 r_n}}$, здесь r_n – радиус поперечной кривизны протектора, r_0 – радиус колеса.

Сила сцепления зависит от возникающих на контурной площади контакта нормальных напряжений. Проведенные исследования показывают, что эти напряжения распределены неравномерно.

Неравномерность распределения нормальных напряжений по ширине протектора в зоне контакта вызвана неодинаковой радиальной жесткостью шины в различных продольных сечениях и видом рисунка протектора.

Под действием крутящего и тормозного моментов, приложенных к колесу, эпюра нормальных напряжений на контакте изменяется. Однако это изменение незначительно. Поэтому для оценки коэффициента сцепления обычно пользуются средними напряжениями на контакте. Эти напряжения зависят от конструкции шины и давления воздуха в ней. Они могут превышать давление воздуха в шине p_w , быть равным ему и ниже его.

Контурная площадь контакта A_c может быть найдена из выражения [1]

$$A_c = k' B_n l = 2k' B_n \left\{ r_0 \left[\frac{\alpha_2 G_k + (\alpha_2^2 G_k^2 - 4\alpha_1 p_w^2 G_k)^{1/2}}{P_w} \right] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где k' – коэффициент насыщенности рисунка протектора; B_n – ширина протектора; l – длина площади контакта.

Среднее контурное давление p_c [1]

$$p_c = \frac{P_w^{1/2} G_k^{1/2}}{2k' B_n r_0^{1/2} \alpha_2^{1/2} \left[1 + \left(1 - \frac{4\alpha_1 p_w^2}{\alpha_2^2 G_k} \right)^{1/2} \right]^{1/2}}. \quad (3)$$

Действующие на контакте касательные напряжения обусловлены деформацией шины под действием радиальной нагрузки, передаваемой с помощью шины тормозного и крутящего моментов, боковой силы и сил сопротивления качению, а также сил, вызываемых различными угловыми скоростями элемента шины при качении в зоне контакта и вне ее. Под касательными напряжениями подразумевают

напряжения, действующие на контурной площади контакта, т. е. на вершинах рисунка протектора в контактной зоне.

В продольном сечении контакта касательные напряжения

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{д}} + \tau_{\text{с}} + \tau_{\text{у}} \pm \Delta\tau_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{д}}$ – напряжения, возникающие в продольном сечении в результате деформации шины; $\tau_{\text{с}}$ – касательные напряжения сопротивления качению; $\tau_{\text{у}}$ – касательные напряжения на площади контакта и вне ее; $\Delta\tau_{\text{пр}}$ – ю; $\tau_{\text{у}}$ – касательные напряжения передаваемого крутящего или тормозящего момента (знак «+» относится к крутящему моменту, «-» – к тормозному).

При взаимодействии шины с дорогой в общем случае качения площадь контакта можно разделить на две зоны – скольжения и сцепления. По мере увеличения силы, вызывающей скольжение, зона сцепления уменьшается, и в момент нарушения сцепления шины с дорогой она пропадает. При большой внешней силе преимущественным является скольжение в направлении действия силы.

Проскальзывание зависит от удельных сил сцепления, которые проявляются в зонах фактического контакта. Взаимодействие шины с поверхностью дороги будет зависеть от распределения материала в поверхностном слое дороги и характеризуется числом неровностей на единице площади, их геометрическим очертанием и распределением по высоте.

В общем случае сила сцепления будет равна сумме двух составляющих. Одна из них обусловлена межмолекулярным взаимодействием на границе раздела шина–дорога в зонах фактического контакта – молекулярная составляющая силы трения $T_{\text{м}}$. Другая обусловлена гистерезисными потерями, возникающими при деформировании поверхностного слоя протектора в зоне контакта внедренными в него выступами поверхности дорожного покрытия $T_{\text{д}}$. Таким образом, на единичной неровности сила трения может быть определена по формуле [1]

$$T = T_{\text{м}} + T_{\text{д}}. \quad (5)$$

Молекулярная составляющая силы трения [1]

$$T_{\text{м}} = (\tau_0 + \beta p_r) A_{\text{ri}} = (\tau_0 + \beta p_r) \pi r h_i. \quad (6)$$

Фрикционные характеристики τ_0 и β зависят от состояния поверхности дороги (загрязненности, влажности и т. д.). Деформационная составляющая силы трения для неровности сферического очертания [1]

$$T_{\text{д}} = \frac{0,25\alpha_{\text{эф}} h_i^2}{\Theta}, \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{эф}}$ – коэффициент гистерезисных потерь при сложном напряженном состоянии; $\alpha_{\text{эф}} = 2,5\alpha$ (здесь α – коэффициент гистерезисных потерь при растяжении-сжатии).

В приведенные выше формулы (6) и (7) входят величины h_i и p_r , т. е. для определения силы трения, возникающей на единичной неровности, необходимо знать закономерности деформирования резины, внедряющейся шаровым индентором.

Общая сила трения протектора с дорогой

$$T_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^{n_r} T_i \Delta n_r, \quad (8)$$

где Δn_r – число выступов, имеющих одинаковую величину внедрения в произвольном сечении.

При вычислении силы сцепления взаимным влиянием отдельных неровностей можно пренебречь.

В случае насыщенного контакта сила трения покоя согласно работам [2, 3] будет

$$T_{\text{общ}} = \frac{0,125 \alpha_{\text{эф}} A_c \varepsilon_{\text{кр}}^{\nu-1} b R_{\text{max}} \xi^2}{\pi \nu r \Theta} + \left(\tau_0 + \frac{0,42 \beta R_{\text{max}}^{1/2}}{r^{1/2} \nu^{1/2} \Theta} \xi \right)^{1/2} \frac{A_c}{2\nu} \xi, \quad (9)$$

где $\xi = \nu \varepsilon - (\nu - 1) \varepsilon_{\text{кр}}$; $\varepsilon_{\text{кр}}$ – сближение, соответствующее вхождению в контакт самой низкой на контурной площади контакта неровности; b , ν , Δ – показатели шероховатости поверхности дороги; Θ – температура в точках контакта; β – угол наклона нити кордного слоя к радиусу; R_{max} – максимальное значение радиуса колеса; r – фактическое значение радиуса колеса; τ_0 , β – фрикционные характеристики поверхности дороги.

Величина ξ зависит от контурного давления:

$$\xi = \frac{3\nu}{b^{1/3} \Delta^{1/3}} (p_c \Theta)^{2/3}. \quad (10)$$

Учитывая зависимость (10), удельную силу трения (сцепления) можно выразить следующим образом:

$$\tau_T = \frac{T_{\text{общ}}}{A_c} = \frac{\alpha_{\text{эф}} \Delta^{1/3} p_c^{4/3} \Theta^{1/3}}{\pi b \frac{3\nu-1}{3\nu}} + \left[\tau_0 + \frac{0,71 \beta \Delta^{1/3} b^{1/3\nu} p_c^{1/3}}{\Theta^{2/3}} \right] \frac{1,45 p_c^{2/3} \Theta^{2/3}}{\Delta^{1/3} b^{1/3\nu}}. \quad (11)$$

Для наиболее типичных видов дорожных покрытий при $b = 3,0$, $\nu = 3$, для резины $\mu = 0,5$ получим

$$\tau = \frac{0,13 \alpha_{\text{эф}} \Delta^{1/3} p_c^{4/3}}{E^{1/3}} + \left[\tau_0 + \beta \Delta^{1/3} E^{2/3} p_c^{1/3} \right] \frac{p_c^{2/3}}{E^{2/3} \Delta^{1/3}}, \quad (12)$$

где E – модуль упругости резины протектора.

Из формул (3) и (11) следует, что удельная сила сцепления (удельная сила трения покоя) зависит как от характеристик шины, от их конструкции ($B_{\text{п}}$, r_0 , α_1 , α_2 , k'), давления воздуха в ней (p_w) и нагрузки на колесо (G_k) механических характеристик резины протектора (μ , E , $\alpha_{\text{эф}}$), так и от микропогографии поверхности дороги (b , ν , Δ), состояния (загрязненности) ее поверхности (τ_0 , β).

Коэффициент сцепления, равный коэффициенту внешнего трения покоя при $G_k = N$, определяется по формуле

$$\varphi = \frac{T_{\text{общ}}}{N} = \frac{\tau}{p_c} = \frac{0,13\alpha_{\text{эф}}\Delta^{1/3}p_c^{1/3}}{E^{1/3}} + \frac{\tau_0}{\Delta^{1/3}E^{2/3}p_c^{1/3}} + \beta. \quad (13)$$

Подставляя из формулы (3) значение p_c , получим

$$\varphi = \frac{2^{1/3}\tau_0 k^{1/3} B_{\text{II}}^{1/3} r_0^{1/6} \alpha_2^{1/6} \vartheta^{1/6}}{\Delta^{1/3} E^{2/3} p_w^{1/6} G_k^{1/6}} + \beta + \frac{0,13\alpha_{\text{эф}}\Delta^{1/3} p_w^{1/6} G_k^{1/6}}{2^{1/3} E^{1/3} k^{1/3} B_{\text{II}}^{1/3} r_0^{1/6} \alpha_2^{1/6} \vartheta^{1/6}}, \quad (14)$$

где $\vartheta = 1 + \left(1 - \frac{4\alpha_1 p_w^2}{\alpha_2^2 G_k}\right)^{1/2}$; $\vartheta \approx 2$.

Таким образом, коэффициент сцепления значительно зависит от состояния поверхности дороги в зоне контакта (фрикционные параметры τ_0 и β), резины протектора (модуль упругости E , коэффициент гистерезисных потерь $\alpha_{\text{эф}}$), менее существенно зависит от геометрических параметров шины (B_{II} , r_0 , α_1 , α_2), давления воздуха в ней, нагрузки на колесо и шероховатости поверхности дороги.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что коэффициент сцепления – многофакторная величина. Для определения сцепных качеств колес конкретного автомобиля необходимо учитывать целый ряд явлений и величин, влияющих на значение коэффициента сцепления: давление воздуха в шине, нагрузка на колесо, характеристики покрытия, температура окружающей среды и др. Другой выход – использование специальных способов, методов и устройств, определяющих коэффициент сцепления колеса непосредственно на месте ДТП.

Существует способ определения коэффициента сцепления по а. с. СССР № 1401903 [4]. Способ включает в себя торможение транспортного средства на испытуемом участке дороги с двух различающихся начальных скоростей движения до полной остановки, при которых производят измерения начальных скоростей движения транспортного средства в режиме торможения, длин тормозных путей и времени торможения, и последующий расчет коэффициента сцепления по формуле

$$\varphi(V) = \varphi_k \cdot 1^{hV}, \quad (15)$$

где $\varphi(V)$ – величина коэффициента сцепления, соответствующая мгновенной скорости V транспортного средства, движущегося в тормозном режиме; φ_k – значение коэффициента сцепления при скорости торможения, близкой к нулю; h – коэффициент, характеризующий изменение коэффициента сцепления при изменении скорости V .

При этом коэффициенты φ_k и h определяются по формулам

$$\varphi_k = \frac{1}{g} \frac{V_{01}V_{02}(t_2 - t_1) + V_{02}S_1 - V_{01}S_2}{t_1 t_2 (V_{02} - V_{01}) + t_2 S_1 - t_1 S_2}, \quad (16)$$

$$h = \frac{g t_1 \varphi_k - V_{01}}{g \varphi_k (S_1 - t_1 V_{01})}, \quad (17)$$

где V_{01} и V_{02} – начальные скорости соответственно 1-го и 2-го торможений, м/с; t_1 и t_2 – время 1-го и 2-го торможений, с; g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$); S_1 и S_2 – длины тормозных путей 1-го и 2-го торможений, м.

Время торможения может быть измерено, например, с помощью электронного секундомера, снабженного контактами для запуска и остановки, которые приводятся в действие от инерционного датчика маятникового типа. Путь торможения может быть измерен, например, рулеткой как расстояние от метки на поверхности дороги, наносимой на нее в момент начала торможения с помощью пистолета-отметчика, устанавливаемого на транспортном средстве, до метки на поверхности дороги от этого же пистолета-отметчика, наносимой на нее после остановки транспортного средства.

Формулы (16) и (17) получены из решения дифференциального уравнения движения транспортного средства в тормозном режиме, описывающего замедление транспортного средства в зависимости от тормозной силы, действующей со стороны дороги на его полностью заблокированные тормозами колеса.

Недостатком данного способа является тот факт, что после ДТП зачастую транспортные средства не имеют технической возможности для движения, поэтому провести испытания не представится возможности.

По ГОСТ 30413–96 [5] в качестве испытательного оборудования следует использовать автомобильную установку типа ПКРС-2 [6]. Для измерения коэффициента сцепления в дорожных условиях и получения нужного массива данных в широком диапазоне скоростей была разработана и оборудована комплекс измерительной и регистрирующей аппаратуры динамометрическая установка, состоящая из автомобиля-тягача и прицепной динамометрической тележки (рис. 1, 2). Эта установка позволяет записывать тормозную силу P_T , вертикальную нагрузку на оси N , угловую и поступательную скорости колеса, а также частоту вращения колеса.

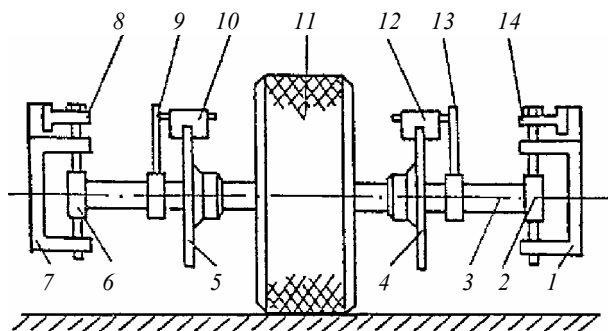


Рис. 1. Конструктивная схема динамометрической тележки (вид сзади)

Динамометрическая тележка представляет собой одноосный прицеп (рис. 1). Колесо 11 жестко связано с опирающейся на шарикоподшипники в стойках 2 и 6 осью 3. Действующая на нее нагрузка воспринимается упругими элементами 8 и 14, которые одним концом жестко соединены с кронштейнами 1 и 7 рамы тележки, а другим – со стойками 2 и 6, скользящими в вертикальном направлении во втулках, если стойки не закреплены болтами в элементах 8 и 14. Расположенные над тормозными дисками 4 и 5 суппорты 10 и 12 соединены со стойками 9 и 13, установленными на оси колеса на шарикоподшипниках. Повороту суппортов по

направлению вращения колеса препятствуют тяги 15 (рис. 2, а), воспринимающие тормозную силу и передающие ее упругим элементам. Ось этих элементов совпадает с центром сцепного устройства, позволяющим смещаться тележке в вертикальной и горизонтальной плоскостях относительно автомобиля-тягача. Тяги 15 через сцепное устройство передают силу P_T от тележки, минуя ее раму.

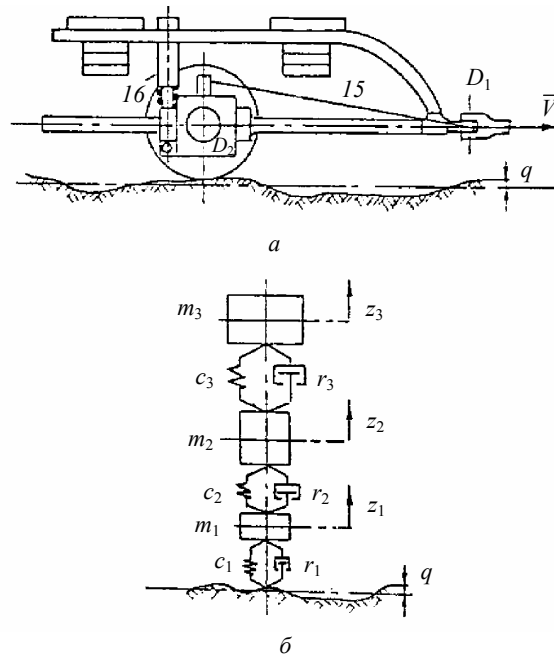


Рис. 2. Конструктивная (а) и динамическая (б) схемы динамометрической тележки

Величину коэффициента сцепления следует вычислять в соответствии с инструкцией по эксплуатации автомобильной установки ПКРС-2 [7].

В процессе экспериментального исследования коэффициента сцепления с помощью динамометрической установки могут быть получены осциллограммы (рис. 3) при различной угловой скорости ω_k , в том числе и при $\omega = 0$. Базовой (нулевой) линией для отсчета величины тормозной силы P_T и вертикальной нагрузки N на оси колеса является верхняя горизонталь, а для угловой скорости ω_k – нижняя. Вертикальные прямые – отметки времени через 0,1 с. Запись этих параметров колеса позволяет определять значение коэффициента φ_0 из соотношения $\varphi_0 = P_T/N$ и величину угловой скорости колеса.

Важным преимуществом этого прибора является возможность непрерывно измерять коэффициент сцепления при обследовании состояния дорог большой протяженности. Недостаток данного устройства – при измерении коэффициента сцепления используется эталонное колесо. Ввиду разнообразия материалов, рисунков и размеров современных автомобильных шин полученное значение коэффициента сцепления можно использовать при исследовании причин ДТП лишь условно.

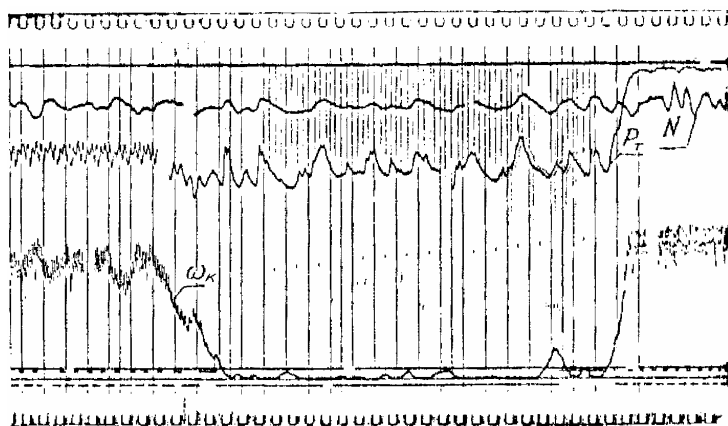


Рис. 3. Осциллограмма непрерывных записей P_T и N при $V = 16,67$ м/с

Объективности полученных данных о коэффициенте сцепления шины автомобиля с полотном дороги возможно добиться только в случае проведения измерений с колесом конкретного автомобиля – участника ДТП. Для этого, зная формулу (1), можно измерять подаваемый на колесо автомобиля – участника ДТП крутящий момент. Исходя из значений крутящего момента, нагрузки на колесо и его радиуса можно узнать значение коэффициента сцепления [8].

Список литературы

1. Ворович, И. И. Лекции по динамике Ньютона. Современный взгляд на механику Ньютона и ее развитие : монография / И. И. Ворович ; науч. ред.: Э. Н. Потетюнко, В. И. Юдович. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. – 680 с. : ил.
2. Ломоносов, М. В. Полн. собр. соч. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР. 1950. – Т. 1. – 620 с.
3. Euler, L. Sur la frottement des corps Solides // Histoire de l'Academie des Sciences et Academie Royal des Sciences et belles art a Berlin, 1748.
4. А. с. 1404903 СССР, МПК G 01 N 19/02 ; G 01 M 17/02. Способ определения коэффициента сцепления / Д. А. Павлюк, С. С. Кизьма (СССР). – Опубл. 23.06.88, Бюл. № 23.
5. ГОСТ 30413–96 «Дороги автомобильные. Метод определения коэффициента сцепления колеса автомобиля с дорожным покрытием».
6. Иларионов, В. А. Коэффициент сцепления шин с дорогой и безопасность движения : учеб. пособие / МАДИ. – М., 1989. – С. 21–27.
7. Инструкция по эксплуатации автомобильной установки ПКРС-2 для контроля ровности и коэффициента сцепления дорожных покрытий / СоюздорНИИ. – М., 1971.
8. Кузнецов, Н. П. Новые подходы при реконструкции механизма дорожно-транспортного происшествия / Н. П. Кузнецов, П. Н. Кузнецов, В. В. Пенкин, С. А. Рассохин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2009. – № 4(44). – С. 13–15.