

МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА СЦЕПЛЕНИЕТО МЕЖДУ КОЛЕЛАТА НА АВТОМОБИЛ И ПЪТНАТА НАСТИЛКА

С. Карапетков, И. Петров

METHODOLOGY FOR STUDYING THE ADHESION BETWEEN WHEEL AND ROAD SURFACES

S. Karapetkov, I. Petrov

Summary: В разработката е представена методика за изследване на сцеплението между колелата и пътната настилка. Методиката може да се използва, както в учебната дейност, така и в експертната практика.

The paper presents a methodology for testing the adhesion between the wheels and the road surface. The methodology can be used both in educational activities and in expert practice.

Keywords: coefficient of adhesion, road surface, methodology.

Въведение

Важна силова характеристика при изследване на движението на автомобила е силата на сцепление, имаща отношение към анализа на дадено пътнотранспортно произшествие (ПТП).

Целта на настоящата работа е да се създаде методика за изследване на коефициента на сцепление между колелата и пътната настилка. За разработването на методиката са необходими знания от „Механика“ и „Теория и управление на автомобила“, които са на познавателни равнища, анализ, синтез и оценка.

Теоретична част

Силата на сцепление между колелата и пътната настилка е максимално възможната по абсолютна стойност сила на триене при чисто търкаляне на колелото или силата на триене при плъзгането му /с търкаляне или без търкаляне/, т.е.

$$(1) \quad P_{\text{ци}} = T_{\text{max}} .$$

Законът на Кулон [3] при чисто търкаляне на колелото има вида

$$(2) \quad T \leq \mu_0 N = P_{\text{ци}} ,$$

където \vec{T} е реалната сила на триене, μ_0 е коефициентът на триене при покой между гумите и пътната настилка, а \vec{N} – съответната нормална реакция в колелото.

При движение на колелото с плъзгане /търкаляне с буксуване, търкаляне с плъзгане или плъзгане без търкаляне/ силата на сцепление е силата на триене при плъзгане, имаща вида

$$(3) \quad T = \mu \cdot N ,$$

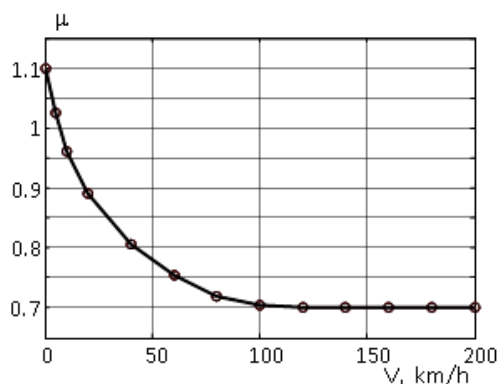
където μ е коефициентът на триене при плъзгане.

Отношението на силата на сцепление към нормалната реакция /съответно μ_0 или μ /, в общия случай се нарича коефициент на сцепление, бележи се с μ и има вида

$$(4) \quad \mu = \frac{P_{\text{сц}}}{N}.$$

Той зависи от елементарните тангенциални сили върху цялата зона на контакта между гумата и опорната повърхнина. Коефициентът на сцепление при чисто търкаляне на колелото е по-общо понятие от коефициента на триене при покой и в общия случай се определя от съвкупността на коефициентите на триене при покой за част от зоната на контакта и коефициентите на триене при плъзгане при различни скорости за останалата част от зоната на контакта. При чисто плъзгане, търкаляне с буксуване или търкаляне с плъзгане, коефициентът на сцепление се определя от съвкупността на коефициентите на триене при плъзгане за елементите на цялото контактено петно.

На фиг. 1 е показана експериментална зависимост между коефициента на триене при плъзгане на гумата и скоростта на контактното петно при сух асфалт, откъдето е видна чувствителната разлика между коефициента на триене при покой и при плъзгане на гумата [1, 2]. Коефициентът на триене при покой във всички случаи надвишава коефициента на триене при плъзгане. При определени условия – нов, сух и чист асфалт, както и добри гуми, коефициентът на триене при покой може да достигне стойност $\mu_0 = 1,3 \div 1,4$.



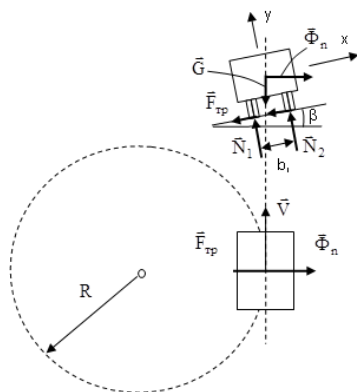
Фиг. 1. Зависимост на коефициента на триене от скоростта на плъзгане на контактното петно на гумата при сух асфалт

Таблица 1

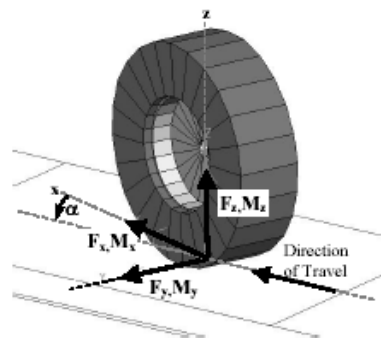
Сцепление при 50 км/ч	Сух път	Влажен път	Локва	Поледица
Нови гуми	0.85	0.65	0.5	0.1
Износени гуми	1	0.5	0.25	0.1

Коефициентът на сцепление освен от скоростта на плъзгане на контактното петно, зависи още от типа и състоянието на пътната настилка /грапавост, влажност, наличие на прах, масло, пясък и др./, от износването на протектора на гумата, от налягането в гумите, от самата нормална реакция на колелото, от температурата и др. Колкото е по-голям коефициентът, толкова е по-добро сцеплението. Стойността на коефициента зависи от пътя и от състоянието на гумите /табл. 1/.

Причините за загуба на напречна устойчивост на автомобила могат да бъдат най-разнообразни – пределно голяма центробежна сила при движение по крива, голяма напречна съставляваща на силата на теглото, страничен вятър, неравности по пътната настилка, различни сили и моменти върху левите и десните колела /теглителни или спирачни/, рязко завъртане на волана от водача, техническа неизправност в кормилната уредба, не добре регулирана спирачна уредба и др. Основен доминиращ параметър за оценка на движението след загубата на напречната устойчивост на автомобила е коефициентът на сцепление.



Фиг. 2. Движение на автомобил по крива



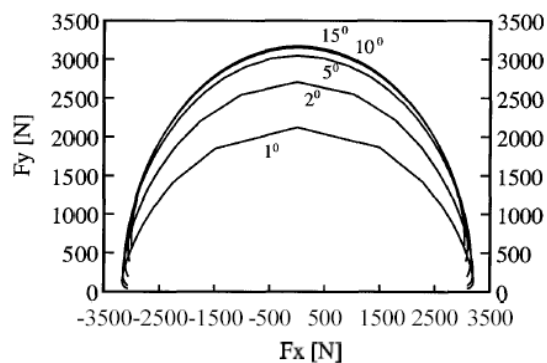
Фиг. 3. Сили и моменти, действащи на контактното петно на гумата [69]

Загубата на напречната устойчивост на автомобила може да се прояви най-вече при движението му по крива. Това движение може да се представи в дадения момент като движение на тяло по окръжност /фиг. 2/. След като се приложи принципът на Даламбер и законът на Кулон относно напречната сила на триене, се получава максимално възможната скорост на движение при запазване на траекторията на масовия център с радиус на кривината R . Тази скорост се нарича критична скорост на странично плъзгане в завоя и има вида

$$(5) \quad V_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{(\mu_n + \text{tg}\beta)}{1 - \text{tg}\beta \cdot \mu_n}} \cdot g \cdot R,$$

където μ_n е напречен коефициент на триене между гумите и пътната настилка; β - ъгъл на напречния наклон, положителен при прав вираж на завоя /при благоприятен наклон/, отрицателен – при обратен вираж; R - радиус на кривина на траекторията на масовия център на автомобила.

При съвременните гуми напречният коефициент на сцепление е приблизително равен на надлъжния, като обикновено го превишава [1, 2]. При направените множество експерименти за различни гуми коефициентът на сцепление при произволно направление на плъзгане на гумата се представя с тъй наречената фрикционна елипса /фиг. 3 и фиг. 4/.



Фиг. 4. Фрикционна елипса за даден ъгъл на завъртане на колелото спрямо следата F_x – надлъжна сила на триене; F_y – напречна сила на триене

Постановка на задачата

За изследване на сцеплението между колелата и пътната настилка е необходимо да се разгледат следните етапи:

1. Изследване на коефициента на сцепление.
 - 1.1. При различни пътни настилки.

- a) суха пътна настилка;
- b) влажна пътна настилка.

1.2. Експериментално определяне на спирачното закъснение по спирачни следи.

2. Изводи от направеното изследване.

Експериментално изследване

За илюстрация на описаната методика, се провеждат следните експерименти:

Разглежда се сцеплението на колелата при различна пътна настилка /фиг. 5 и фиг.6/.



Фиг.5. Схема на автомобил при сух път



Фиг.6. Схема на автомобил при влажен път

На фиг. 5 е показан спирачен път на автомобил с маса 1000 kg, движещ се със скорост 130 km/h на суха настилка при аварийно спиране без ABS (в червено) и спирачен път при аварийно спиране с ABS в син цвят. А на фиг. 6 имаме движение по влажна настилка на същия автомобил - спирачен път при аварийно спиране без ABS (в червено) и спирачен път при аварийно спиране с ABS в син цвят. И при двата експеримента се наблюдава съществена разлика в дължината на ефективния спирачен път в полза на автомобилите с ABS.

За изследване на процеса на спиране е удобно да се приложи методът на кинетостатиката за цялата механична система, като се добавят диференциалите уравнения, описващи ротационната съставяща на движението на колелата. В случай на търкаляне на колелата без плъзгане, уравненията имат вида

$$(6) \quad \sum X_i = 0: \quad T_1 - T_2 - m \cdot g \cdot \sin \alpha - m \cdot a_c - R_x = 0;$$

$$(7) \quad \sum Y_i = 0: \quad N_1 + N_2 - m \cdot g \cdot \cos \alpha - R_y = 0;$$

$$(8) \quad \sum M_{A_{ii}} = 0: \quad h_c \cdot m \cdot a_c - b \cdot N_2 + f_{тр} \cdot N_1 + f_{тр} \cdot N_2 + (\cos \alpha \cdot b_1 + \sin \alpha \cdot h_c) \cdot m \cdot g + h_c \cdot R_x + b_1 \cdot R_y + M_R = 0;$$

$$(9) \quad J_1 \cdot \frac{a_c}{r_k} = M_{дв} - f_{тр} \cdot N_1 - r_d \cdot T_1;$$

$$(10) \quad J_2 \cdot \frac{a_c}{r_k} = r_d \cdot T_2 - f_{тр} \cdot N_2.$$

Системата се решава аналитично и се определя спирачното закъснение на автомобила в зависимост от спирачните моменти. С помощта на закона на Кулон се извежда условието за чисто търкаляне на колелата. Плъзгане на колелата се получава, ако спирачните моменти за съответната ос надвишат определена критична стойност, зависеща основно от коефициента на триене при покой /коефициента на сцепление при чисто търкаляне/ и нормалната реакция.

По-голям практически интерес представлява движението на автомобила при аварийно спиране, когато силите на триене са при плъзгане на колелата. Тогава в системата уравнения те се заменят чрез релациите $T_{1,2} = \mu \cdot N_{1,2}$.

Съгласно метода на кинетостатиката условията за равновесие на външните сили с участието на инерционната, като се имат предвид зависимостите $\vec{F} = -m \cdot \vec{a}_c$ и $M_{\text{тр}1,2} = f_{\text{тр}} \cdot N_{1,2}$, придобиват вида

$$(11) \quad \sum X_i = 0: \quad -\mu \cdot N_1 - \mu \cdot N_2 - m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot j = 0;$$

$$(12) \quad \sum Y_i = 0: \quad N_1 + N_2 - m \cdot g \cdot \cos \alpha = 0;$$

$$(13) \quad \sum M_{A_i} = 0: \quad f_{\text{тр}} \cdot N_1 + f_{\text{тр}} \cdot N_2 - h_c \cdot m \cdot j - b \cdot N_2 + (\cos \alpha \cdot b_1 + \sin \alpha \cdot h_c) \cdot m \cdot g = 0.$$

Тук b е надлъжната база на автомобила; b_1 и b_2 – разстояния от проекцията на масовия център върху равнината, образувана от двете оси, съответно до предната и задната ос; h_c – височина на масовия център на автомобила; μ – коефициент на сцепление, в случая представляващ коефициента на триене при плъзгане; $f_{\text{тр}}$ – коефициент на триене при търкаляне.

Спирачното закъснение на автомобила се извежда от първите две уравнения и има вида

$$(14) \quad j = (\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot g.$$

Ъгълът α се приема за положителен при изкачване на автомобила и за отрицателен – при спускане. Реакциите в колелата имат вида

$$(15) \quad N_1 = \frac{[b_2 + \mu \cdot h_c - f_{\text{тр}}]}{b} m \cdot g \cdot \cos \alpha \approx \frac{[b_2 + \mu \cdot h_c]}{b} m \cdot g \cdot \cos \alpha;$$

$$N_2 = \frac{[b_1 - \mu \cdot h_c + f_{\text{тр}}]}{b} m \cdot g \cdot \cos \alpha \approx \frac{[b_1 - \mu \cdot h_c]}{b} m \cdot g \cdot \cos \alpha.$$

От изразите е видно преразпределението на нормалните реакции в колелата по сравнение със статичните – тези на предната ос се увеличават, а на задната – намаляват. Ето защо при спиране на автомобила под действието на инерционната сила предната част на автомобила се притиска към пътната настилка, а задната се повдига.

През времето за нарастване на спирачното закъснение от нула до максималното – t_n , отрицателното ускорение на ППС нараства по абсолютна стойност от нула до достигане на максималната си стойност. През този период ъгловата скорост на колелата започва да намалява, но колелата още се търкалят без плъзгане – силата на триене удовлетворява неравенство $T_{1,2} \leq \mu_0 \cdot N_{1,2}$ и не е достигнала максималната си стойност. В момента след достигане на граничната сила на триене колелата започват да се плъзгат. Към този момент спирачното закъснение достига максималната си стойност, което съвпада с момента на началото на блокиране на колелата на МПС – момента, съответстващ на началото на спирачните следи.

Най-лесен и достатъчно точен метод е спирачното закъснение да се определя чрез експеримент по спирачни следи. Ако ПТП е в населено място, скоростта при експеримента е добре да бъде при 50 km/h, но само ако пътните условия гарантират безопасността на експеримента. При хлъзгав участък скоростта на експеримента трябва да е по-малка – не по-голяма от 30-40 km/h. В случаи на местопроизшествия извън населено място скоростта може и да е по-висока, но във всички случаи трябва да се отчитат възможностите на водача и условията за безопасност.

При невъзможност да се направи експеримент с участвалото в произшествието превозно средство, може да се извърши такъв, но задължително със същия модел МПС. Условията при експеримента трябва максимално да се доближават до тези, които са били по време на ПТП. Не винаги това е възможно и експертът трябва в достатъчна степен да оценява възможното отклонение от действителните условия при експеримента и тези от момента на произшествието.

Скоростта на автомобила е необходимо да се измерва с радар. Ако това е невъзможно, скоростта се фиксира чрез наличния скоростомер на автомобила, който след това се проверява, като се отчита евентуалната грешка.

Експериментът се провежда по следния начин: Водачът на автомобила ускорява

автомобила до скорост, малко надвишаваща зададената от експерта. След това той отпуска педала на газта до достигане на зададената скорост. Непосредствено преди ефективното задействане на спирачната уредба, водачът подава светлинен сигнал до оператора на радара, който регистрира скоростта.

Водачът задейства ефективно спирачната уредба с максимално натискане на спирачния педал и го задържа така до окончателното спиране на автомобила. След това той изключва двигателя и задейства ръчната спирачка, за да се запази положението на автомобила в края на следите. Измерват се спирачните следи, след което опитът се повтаря.

При дължина на следите, отличаваща се от тази при предходния опит на повече от 5%, опитът се счита за невалиден и се повтаря. Общият брой на валидните опити трябва да е три. При завъртане на автомобила трябва да се изяснят причините за това.

Ефективният спирачен на автомобила преди ПТП има вида

$$(16) \quad s = \frac{V_{\text{бл}}^2}{2j} = \frac{[V - 0,5 \cdot t_n \cdot j]^2}{2j},$$

където t_n е времето за нарастване на спирачното закъснение от нула до максималното, а $V_{\text{бл}}$ - скоростта в момента на блокиране на колелата.

Получаваме уравнение за определяне на максималното спирачно закъснение от вида

$$(17) \quad 0,25 \cdot t_n^2 \cdot j^2 - (2s + t_n \cdot V)j + V^2 = 0,$$

чието решение се определя по формулата

$$(18) \quad j = \frac{2 \cdot s + t_n \cdot V - \sqrt{(2s + t_n \cdot V)^2 - t_n^2 \cdot V^2}}{0,5 \cdot t_n^2}.$$

Анализ на резултатите

От направеното изследване може да се потвърдят известните в литературата изводи:

- ✓ Наблюдава се зависимост на коефициента на сцепление (триене) от пътната настилка и от скоростта на колелата.
- ✓ Колкото е по-голям коефициентът на сцепление, толкова по-висока може да бъде скоростта в завой.
- ✓ Спирачното закъснение се използва в експертния анализ при определянето на действителната скорост на МПС към момента на произшествието и при определянето на опасната зона за спиране.

Дадената методика може да се използва в лабораторните упражнения по дисциплината „Автотехническа експертиза“.

Литература

- [1] Карапетков С., Разследване на ПТП, технически коментар на юриста, 2010 г.;
- [2] Карапетков С., Автотехническа експертиза, 2005 г.;
- [3] Писарев А., Курс по теоретична механика I част, 1986 г.

АДРЕСИ ЗА КОРЕСПОНДЕНЦИЯ

проф. д.т.н. инж. Станимир Карапетков
ТУ-София, Факултет и Колеж – Сливен
GSM:0895590111
e-mail: skarapetkov@yahoo.com

инж. Иван Петров
ТУ-София, Факултет и Колеж – Сливен
GSM:0894630548
e-mail: aladina@abv.bg