

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ ПРИ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА СЦЕПЛЕНИЕ СПРЯМО ПЪТЯ И АВТОМОБИЛНАТА ГУМА

Пенко Цветков Петков, Валентин Александров Николов
ppetkov@vtu.bg, vaa@vtu.bg

*Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”,
Гео Милев 158, София 1574,
БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** автомобилна гума; пътно покритие; сцепление с пътя; коефициент на сцепление; методи за определяне на коефициента*

***Резюме:** Сцеплението на ходовите колела с пътя е важен параметър, от който зависят показателите на редица експлоатационни свойства на автотранспортните средства (АТС). Върху характера на изменение на сцеплението оказват влияние различни външни (по отношение на автомобилната гума) и вътрешни фактори, които зависят от изходните характеристики на гумата. За количествена оценка на сцеплението на опорната повърхност и пневматичната гума (ПГ) е приет коефициентът на сцепление. Задачите за определяне и анализ на резултати от теоретични и експериментални изследвания на коефициента на сцепление спрямо пътното покритие и автомобилната ПГ са едни от най-сложните в пътното строителство и теорията на движение на АТС.*

Към настоящия момент методите, прилагани в пътното строителство и при изпитване на автомобила за определяне на коефициента на сцепление се различават по своята същност. Получените резултати за коефициента на сцепление чрез използване на различните методи също се различават в количествено отношение. Целта на настоящата работа е да се извърши сравнителен анализ на резултати, получени при експериментални изследвания по методи за пътя и такива, използвани при изпитвания на автомобилната ПГ. Получаването на обобщени стойности за коефициента на сцепление от прилагането на различните методи за неговото определяне ще спомогне за по-пълно отчитане влиянието на типа на пътното покритие и характеристиките на ПГ върху повишаването на безопасността на движение на автомобилния транспорт.

УВОД

Ефективната експлоатация и безопасността на движение на автомобилния транспорт в значителна степен зависят от качеството и състоянието на пътната инфраструктура. Показателите на експлоатационните свойства и управлението на системите за активна безопасност на АТС са непосредствено свързани с взаимодействието между ходовите колела и опорната пътна повърхност. Процесът на взаимодействие на колелото с пътя е сложен, предвид разнообразния структурен състав на пътната повърхност, изходните параметри на автомобилната ПГ и приложените сили и моменти. Едно от важните свойства на взаимодействието между колелото и пътя е

сцеплението в контактната зона на ПГ и пътното покритие. Проблемите за изследване и анализ на сцеплението на пътните покрития и на ПГ спрямо опорната повърхност са едни от най-актуалните в пътното строителство и теорията на движение и експлоатацията на АТС.

1. Състояние на проблема

Физическото свойство сцепление между автомобилната гума и опорната повърхност е обект на изследване, както от автомобилни, така и от страна на пътни инженери и специалисти, конструктори и технолози на пневматични гуми. Върху този проблем са посветени значителен брой експериментални и теоретични разработки [2], [5], [6], [10], [13]. В специалната литература съществуват различни трактовки по отношение формирането на сцеплението. Същността на сцеплението основно се изразява с кинематично и силово взаимодействие в контактната зона между гумата и пътната повърхност. Силовото взаимодействие се реализира чрез сили от външно триене (при търкаляне и преплъзване) между двете допиращи се в контактната зона и притиснати една към друга повърхнини от гумата и пътя, сили на зацепване (между грайферите на протектора и опорната повърхност) и адхезията, т. е. взаимното проникване между частици от пътното покритие и гумата в мястото на контакта [1], [3], [11].

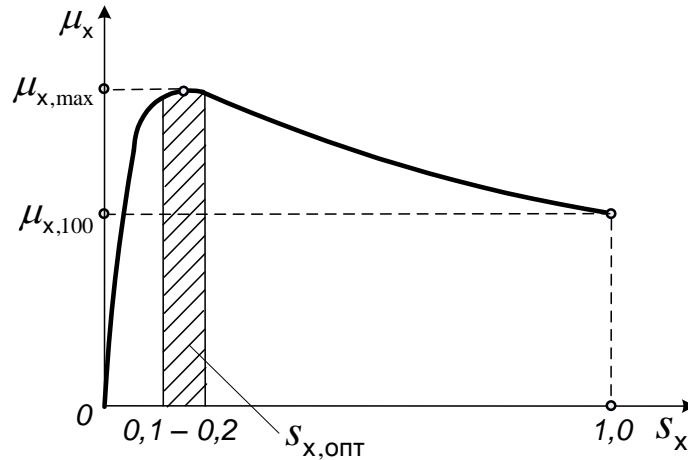
Чрез сцеплението се осъществява предаването на сили и моменти от колелото към пътя, което ограничава тяхната стойност до максимално възможната тангенциална реакция $R_{xy,max}$ от опорната повърхност към колелото. При движение върху твърдо пътното покритие за реализиране на сцеплението основно значение имат силите на триене в контактната зона [12]. Поради деформацията на ПГ сцеплението има сложен характер и се оценява чрез силата на сцепление и коефициента на сцепление μ . В общия случай тангенциалната реакция $F_\mu = R_{xy,max}$ е насочена произволно в равнината на опорната повърхност. Отношението на силата на сцепление F_μ (тангенциалната реакция $R_{xy,max}$) към нормалното натоварване върху колелото G_k или равнодействащата му нормална реакция от пътя R_z , което поради специфичния си характер има вида на коефициент на триене при плъзгане, представлява коефициентът на сцепление, т. е.

$$(1) \quad \mu = \mu_{xy} = R_{xy,max} / G_k = F_\mu / G_k = F_\mu / R_z.$$

Различават се коефициент на сцепление спрямо пътната повърхност в надлъжно направление μ_x и в напречна (странична) посока μ_y . Спрямо колелото коефициентът на сцепление в надлъжно направление се определя като отношение на надлъжната реакция R_x към нормалното натоварване G_k (вертикалната реакция R_z). Коефициентът μ_x осигурява теглително-скоростните и спирачните свойства на автомобила, а μ_y - устойчивостта и управляемостта му. При анализ на сцепните свойства на ПГ в широка област на товарни режими и условия на движение се използва т. нар. $\mu_x - s_x$ диаграма на изменението на коефициента μ_x от относителното преплъзване s_x на колелото в контактната зона на ПГ с опорната повърхност. Видът на диаграмата е показан на фиг. 1 [13]. В случая в контактната зона не действа странична реакция, т. е. $R_y = 0$. За режим на спиране на автомобила относителното преплъзване се определя от израза

$$(2) \quad s_x = (V_0 - \omega_k r_d) / V_0 = 1 - (\omega_k / V_0) r_d,$$

където V_0 е линейната постъпателна скорост на колелото, m/s ; ω_k - ъгловата скорост на колелото, s^{-1} ; r_d - динамичният радиус на колелото, m .



Фиг. 1. Зависимост на коефициента на сцепление в надлъжно направление от относителното преплъзване в контактната зона

От графиката на фиг. 1 е видно, че при определени граници на изменение на относителното преплъзване $s_{x,опт}$ коефициентът на сцепление при определени пътни условия достига максимална стойност $\mu_{x,max}$. В справочната литература се представят стойности за коефициента на сцепление при пълно плъзгане на колелото $\mu_{x,100}$, т. е. това представлява коефициентът на триене при плъзгане. Този коефициент винаги е по-малък в сравнение с коефициента на триене при покой [5].

За определяне на коефициента на сцепление на автомобилната ПГ спрямо опорната повърхност в практиката се прилагат различни методи. В лабораторни условия за експериментално изследване на сцепните свойства на ПГ се използва различно стендово оборудване за статични и динамични изпитвания на нетъркалящи и търкалящи се колела. В такива случаи опорната повърхност се представя чрез образци от пътни покрития с различен структурен състав. Уредбите за пътни изследвания на сцеплението са представени от специални „пети колела”, монтирани към изпитвания автомобил, до различни конструкции динамометрични колички и автомобили, оборудвани като динамометрични лаборатории. Методите за измерване на параметрите, необходими за определяне на коефициента на сцепление са адаптирани към конструктивните особености на изпитвателното оборудване и използваната измервателната апаратура [3], [4], [8], [13].

Разработени са и теоретични математически модели за изследване на сцеплението между ПГ и пътното покритие, които се основават на предварителни експериментални данни. Общото в моделите е, че използват математически зависимости за апроксимиране на експериментално получена функция $\mu_x(s_x)$. Реализацията на моделите се постига чрез използване на програмни продукти за РС [10], [11], [12].

В нашата страна въпросите за сцеплението между пътното покритие и автомобилната ПГ се разглеждат от две гледни точки – на инженерите по пътно строителство и специалистите по автомобилна техника. От страна на пътните инженери по темата основно е работил инж. А. Врацов, а в по-ново време проф. д-р инж. П.

Стефанов, гл. ас. д-р инж. В. Попова и д-р инж. Г. Чанков [7], [9]. С изследване на сцеплението на ПГ спрямо пътя и провеждане на експериментални изпитвания в това направление активно работят специалисти по автомобилна техника от специализиращите катедри на Технически университет – София и Русенски университет „Ангел Кънчев”.

Целта на работата е да се сравнят и анализират резултати за коефициента на сцепление, получени от експериментални изследвания по методи, прилагани в пътното строителство и при изпитване на автомобилни ПГ.

2. Методи за определяне на коефициента на сцепление

Един от методите за определяне на коефициента на сцепление в надлъжно направление μ_x между автомобилната ПГ и пътното покритие е чрез използване показателите на спирачната ефективност на автомобила, снети при пътнo-полигонни изпитвания [8]. При спиране върху сух хоризонтален път с асфалтобетонно покритие максималната спирачна сила $F_{\text{сп, max}}$ е значително по-голяма от останалите съпротивителни сили. В такъв случай, без да се допусне голяма грешка, може да се приеме силата от въздушното съпротивление $F_w \approx 0$ и силата от съпротивление при търкаляне $F_f \approx 0$. Тогава, ако всички колела на автомобила спират при еднакви условия по сцепление, уравнението на движение има вида

$$(3) \quad \left(-\frac{dv}{dt} \right)_{\text{max}} (G/g)\delta_B = j_{\text{сп, max}} (G/g)\delta_B = G\mu_x,$$

където $j_{\text{сп, max}}$ е максималното спирачно закъснение в процеса на спиране; G - пълното тегло на автомобила; δ_B - коефициентът, характеризиращ влиянието на въртящите се маси (приема се, че спирането се извършва с изключена предавка в предавателната кутия и колелата са на границата на блокиране, при което $\delta_B \approx 1,01$).

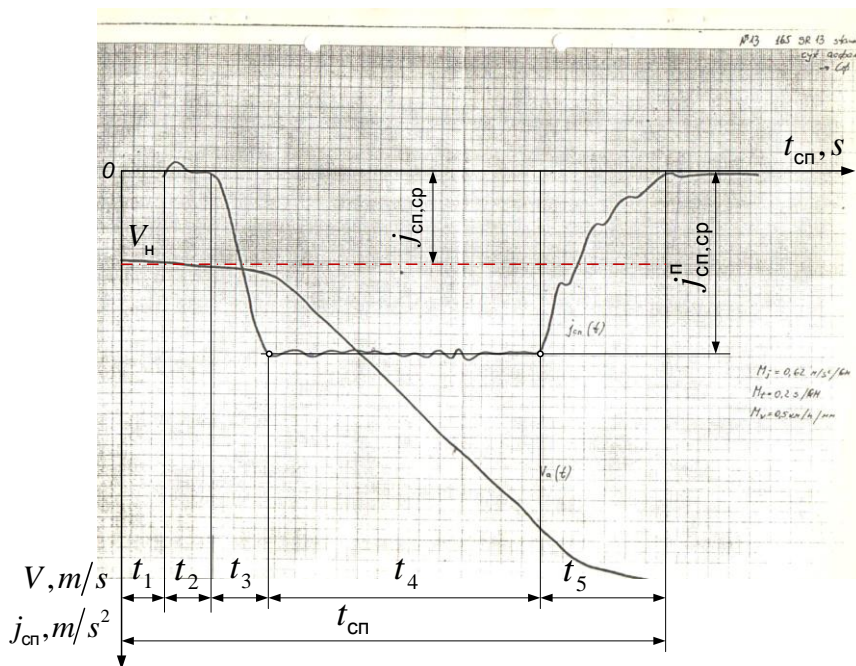
За реализиране на метода изпитваният автомобил се окомплектова с измервателна апаратура тип „пето колело”, чрез която се регистрират скоростта при спирането, спирачното закъснение, спирачният път и силата, приложената върху спирачния педал. В реално време се извършва запис на спирачна диаграма, вид на която е показан на фиг. 2. След обработка на спирачната диаграма с отчитане на съответните мащаби се определят средното спирачно закъснение $j_{\text{сп, ср}}$, средното постоянно спирачно закъснение $j_{\text{сп, ср}}^n$ и отделните времена при спирането. Общото време за спиране се определя от сумата

$$(4) \quad t_{\text{сп}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \text{ s.}$$

За определяне на коефициента μ_x значение имат времената t_3 и t_4 . През времето t_3 спирачното закъснение нараства от 0 до $j_{\text{сп, max}}$, а през времето t_4 автомобилът спира с максималното спирачно закъснение $j_{\text{сп, max}} = j_{\text{сп, ср}}^n = \text{const}$. Коефициентът на сцепление се пресмята от израза

$$(5) \quad \mu_x = \delta_B V_H / [g(t_4 + 0,5t_3)],$$

където V_H е началната скорост, от която е започнало спирането, m/s .



Фиг. 2. Експериментално снета спирачна диаграма

В случай, че са определени спирачният път S_3 , съответстващ на времето t_3 и пътят S_4 за времето t_4 , тогава за изчисление на коефициента на сцепление се използва формулата

$$(6) \quad \mu_x = \delta_B V_H^2 / [2g(S_4 + 0,5S_3)].$$

На базата на предварително разработен теоретичен модел в работата [7] е извършено широкомащабно практическо измерване на коефициента на сцепление (проведени са 3946 измервания с уред Grip Tester, собственост на Техническия университет във Виена) по пътища от основната пътна мрежа в страната с дължина 197,30 km. След обработка и анализ на данните е предложена система за категоризация в 5 класа на експлоатационното състояние на пътното покритие. Определени са стойностите на коефициента на сцепление за характерни участъци от пътя: тунели, хоризонтални кръгови криви с радиус близък до минималния и кръгови кръстовища. Изведени са гранични стойности на коефициента на сцепление за вземане на оперативни мерки по време на експлоатация на пътищата. Дефинирано е едно ново понятие в пътната теория – „коефициент на изненадата” за прогнозиране на риска от възникване на пътнотранспортни произшествия (ПТП) при недостатъчни стойности на коефициента на сцепление. Създадена е методика за обследване на участъци с повишена аварийност, както и принципи за стратегия за управление на коефициента на сцепление.

В дисертационния труд [9] също е предложен сполучлив теоретичен модел по темата. В експерименталната част са извършени измервания на повърхностните характеристики на пътното покритие с различни методи и уреди (метода „пясъчно петно”, SRT махало, машината Венер/Шулце). На тази база по метода Венер/Шулце е направена прогноза за стойностите на коефициента на сцепление при бъдещо транспортно натоварване.

3. Сравнение на резултати от изследвания на сцеплението

В съответствие с представения метод е извършено определяне на коефициента на сцепление на ПГ с пътното покритие чрез използване на показатели, получени при спиране на автомобил. Експериментите за определяне на тези показатели са проведени

върху участък от новоизградено асфалтобетонно пътно покритие (участък от автомагистрала «Тракия» в района на с. Цалапица). Надлъжният наклон на изпитвателния пътен участък е предварително измерен с лата и нивелир. За елиминиране влиянието на наклона измерванията са провеждени трикратно в двете посоки – права и обратна, като за краен резултат е приета средната стойност от три опита. Опитите са извършени с лек автомобил, окомплектован с гуми от типоразмер 165 R 13 S «ВИДА». В таблица 1 са представени получените резултати от експериментите за спирачния път, спирачните закъснения, времето за спиране и пресметнатата средна стойност на коефициента на сцепление. Средната аритметична стойност на коефициента на сцепление е определена от израза

$$(7) \quad \bar{\mu}_x = \left(\sum_{i=1}^n \mu_i \right) / n,$$

където n е броят на опитите.

При експериментално оценяване на сцепните качества на пътната повърхност по методите, прилагани в пътното строителство са определени осреднени стойности за надлъжния коефициент на сцепление. За сухо асфалтобетонно пътно покритие в зависимост от неговото експлоатационно състояние стойностите на коефициента μ_x се променят в границите 0,7 – 0,85 [6], [7]. Горната граница на коефициента на сцепление (0,8 – 0,85) се отнася за нови пътни покрития, а за пътища с продължителен срок на експлоатация стойността на μ_x е около 0,7.

От сравнението на представените резултати от експериментални изследвания, получени по метода за сцеплението на автомобилната гума и метода за пътя е видно, че за новоизградено асфалтобетонно покритие стойностите на надлъжния коефициент на сцепление са от един порядък (за гумата $\bar{\mu}_x = 0,824$, а за пътното покритие $\mu_x \approx 0,8 - 0,85$).

Таблица 1. Опитни данни от изпитване на спирачна динамика върху сух асфалт на гуми 165 R 13 S «ВИДА» [8]

№ по ред	Показатели, означения, размерност	Стойности в двете посоки		Средна стойност
		права	обратна	
1	2	3	4	5
1.	Спирачен път $S_{сп}, m$	34,5 32,3 33,3	35,5 32,2 35,4	33,9
2.	Средно спирачно закъснение $j_{сп, сп}, m/s^2$	5,0 4,7 4,9	4,9 6,3 5,5	5,2
3.	Средно постоянно спирачно закъснение $j_{сп, сп}^n, m/s^2$	8,0 8,25 8,0	7,75 8,25 7,5	8,0
4.	Начална скорост, от която започва спирането $V_n, km/h$	80,5 79,6 79,7	79,6 80,0 80,0	79,9
5.	Време за спиране $t_{сп}, s$	3,7 3,7 3,7	3,8 3,2 3,6	3,6
6.	Коефициент на сцепление $\bar{\mu}_x$			0,824

4. Изводи и препоръки

Както в автомобилната техника, така и в пътното строителство за експериментално изследване на сцеплението са разработени различни методи, изискващи използване на различни уреди и специални устройства, окомплектовани с измервателна апаратура. В практиката не съществува експериментален метод при изпитване на автомобил за непосредствено измерване на коефициента на сцепление на автомобилната ПГ спрямо пътя. Обикновено се прилагат косвени методи, при които се измерват различни параметри на нетъркалящо или търкалящо се колело, след което коефициентът на сцепление се пресмята по известни зависимости.

На базата на натрупания опит и достижения, както на пътните инженери, така и на специалистите по автомобилна техника, конструкторите и технолозите на ПГ е наложително изработването на нормативен документ по темата за сцеплението. В документа трябва да бъде утвърдена единна методика за определяне на коефициента на сцепление, използваните методи и уреди за измерване, граничните му стойности в зависимост от експлоатационното състояние на пътното покритие и аварийността, както и метод за неговото прогнозиране. Предвид пряката връзка между коефициента на сцепление при различни пътни условия и безопасността на движение, е необходимо резултатите от изследванията в тази област да достигнат до широк кръг от специалисти, за да намерят по-бързо практическо приложение.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1]. Балакина Е. В., Н. М. Зотов, А. П. Федин, Т. А. Голубева. О разных трактовках понятиях коэффициента сцепления шины с дорогой. Известия Волгоградского государственного университета, серия „Наземные транспортные системы” (выпуск 12), № 6 (166), 2015. С. 13 – 15.
- [2]. Бухин Б. Л. Введение в механику пневматических шин. М.: Химия, 1988. 224 с.
- [3]. Гергенов С. М., В. А. Корчагин, Ж. В. Дарханов. Исследования сцепных свойств автомобильных шин. Ползуновский альманах, № 2, 2015. с. 91 – 95.
- [4]. Клец Д. М. Экспериментальное определение коэффициента сцепления колес с дорогой. Механика машинобудування, 2012, № 1. с. 57 – 65.
- [5]. Купреянов А. А. Влияние трибологических характеристик пары трения эластомер – опорное основание на тягово-сцепные свойства автомобильного колеса. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 12. с. 1 – 20.
- [6]. Николов В. А. Проектиране и строителство на пътища. София, ВТУ “Т. Каблешков”, 2012. 588 с.
- [7]. Попова В. Изследване, анализ и оценка коефициента на сцепление на асфалтови пътни настилки и влиянието му върху безопасността на движение. Дисертационен труд за ОНС „доктор“, УАСГ, 2015.
- [8]. Сравнителни пътно-полигонни изпитвания на пневматични гуми – тема № 83 – 118. Етап: Отчет за получените резултати. Технически университет – София. Поделение «Учебно-производствена дейност»
- [9]. Чанков Г. Анализ и оценка на методите за изследване на коефициента на сцепление на асфалтови пътни настилки и прогноза на грапавоста им. Дисертационен труд за ОНС “доктор“, УАСГ, 2017.
- [10]. Шадрин С. С. Математическое моделирование процесса взаимодействия пневматической шины с опорной поверхностью. Автомобильный транспорт, № 2(2) декабрь, 2014. 13 с.

- [11]. Alvarez L., J. Yi, R. Horowitz and L. Olmos. Dynamic Friction Model Based Tire–Road Friction Estimation and Emergency Braking Control. Transactions of the ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. March 2005, vol. 127. pp. 22 – 32.
- [12]. Lui M., X. Rong, Y. Li and Y. Yiu. Estimated the Tire–Road Friction Coefficient Using Disturbance Observer with Compensator. The Open Automation and Control Systems Journal, 2015, Volume 7. pp. 2286 – 2292.
- [13]. Žuraulis V., K. Kemzuraite, D. Wieckowski. Investigation of Dynamic Properties of Vehicle in Various Friction Condition Simulated with use of Skidcar System. pp. 89 – 99.

COMPARATIVE ANALYSIS FOR DETERMINATION OF COHESION COEFFICIENT IN RELATION TO THE ROAD AND THE AUTO TIRE

Penko Tsvetkov Petkov, Valentin Aleksandrov Nikolov
ppetkov@vtu.bg, vaa@vtu.bg

*Todor Kableshkov Univeusity of Transport,
158 Geo Milev Street, Sofia 1574,
BULGARIA*

Key words: *car tires; road surface; grip with the road; split coefficient of friction; methods for determining the coefficient*

Abstract: *The friction between the wheels and the road is an important parameter on which the performance characteristics of the vehicles depend. Different external (in terms of the tire) and internal factors depending on the tire's original characteristics are influenced by the nature of the change in friction. The split coefficient of friction has been adopted to quantify the friction between the support surface and the pneumatic tire (PT). The tasks for determining and analysing the results of the theoretical and experimental studies of the coefficient of adhesion versus road surface and automotive PT are some of the most complex ones in vehicle road construction and theory of motion.*

Currently methods used in road construction and vehicle testing to determine the coefficient of friction differ in their nature. The results obtained for the coefficient of friction of the various methods also differ in quantitative terms. The purpose of this work is to perform a comparative analysis of the results obtained in the experimental studies of the road methods and those used in vehicle PT tests. Obtaining the aggregated coefficient of friction by applying of different methods for its determination will improve taking into account the impact of the road surface and PT on better road safety of the car transport.