

АНАЛИТИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА РАДИАЛНАТА ЕЛАСТИЧНОСТ НА ПНЕВМАТИЧНА ГУМА

Пенко Цветков Петков

tt@vtu.bg

*Катедра „Транспортна техника”,
Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”
Гео Милев 158, София 1574,
БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: *пневматична гума, страница, композитна структура, вътрешно налягане, модул на линейна еластичност, коефициент на радиална еластичност*

Резюме: *Пневматичната гума със своята своеобразна тороидална форма се отнася към т. нар. многопластови каучуково-кордни (композитни) структури, които се характеризират с анизотропните си свойства. При изследване на поглъщащата и изглаждащата способност, както и на вибрационната активност на гумата, трябва да са известни нейните коефициенти на еластичност. В практиката най-често се прилагат експериментални методи за определяне на еластичностите на гумата.*

В работата се предлага аналитичен метод за определяне на радиалната еластичност на пневматичната гума. Целта е да се намери аналитична зависимост на коефициента на еластичност в радиално направление от геометричните параметри на страницата на гумата и механичните свойства на материалите. Методът е приложен за конкретен типоразмер гума с радиална конструкция. Получените резултати са сравнени с експериментални и могат да бъдат използвани в теоретични модели за изследване на вибрационната активност на пневматични гуми.

Увод. Чрез пневматичната гума (ПГ), като елемент от ходовото колело се осъществява взаимодействието на транспортното средство с пътната повърхност. От изходните характеристики на ПГ практически зависят всички експлоатационни свойства на автомобила. Със своята своеобразна тороидална форма ПГ се отнася към т. нар. многопластови гуменокордни (композитни) структури, които се характеризират с анизотропните си свойства. При изследване на поглъщащата и изглаждащата способност, както и на вибрационната активност на гумата, трябва да са известни нейните коефициенти на еластичност.

1. Състояние на проблема и цел на разработката

В реални експлоатационни условия еластичностите на ПГ зависят от редица фактори – размерите, вътрешното налягане, свойствата на материалите, скоростта на движение, динамичните натоварвания. Експерименталното определяне на коефициентите на еластичност на ПГ се извършва върху специално стендово

оборудване [1], [10]. За определяне на динамичните коефициенти на еластичност при някои от експерименталните методи се прилага принципът на импулсното въздействие върху протектора на ПГ. При липса на експериментални данни се препоръчва използването на емпирични зависимости [5].

За аналитично изследване на еластичните константи са предложени различни теоретични модели на ПГ [6], [7], [9]. Те се основават на мембранно-черупковата теория за структурата на гумата. Често използван в подобни случаи е моделът „пръстен върху еластична основа”. В модела страниците на гумата се представят като еластична система, разпределена в радиално и тангенциално направление под действие на вътрешното налягане p . Еластичната основа е равномерно разпределена по направление на двата края – единият е свързан с пръстена, а другият – с бортовата зона на ПГ. Чрез моделите се определят различни еластични константи на страницата, но те не отразяват точно тороидалната форма на гумата и деформацията на съставните елементи.

Напрежението в кордните нишки от каркаса на ПГ се изменя в зависимост от деформацията. Това е свързано с изменение на еластичностите на страниците, което е пропорционално на вътрешното налягане в гумата. Освен това деформацията на профила на напречното сечение на ПГ предизвиква допълнително увеличаване на потенциалната енергия в гумено-кордната структура. Принципът за екстремум на пълната енергия води до допълнителна еластичност, която не зависи от вътрешното налягане. Цялата еластичност на страниците може да бъде получена чрез сумиране на отделните съставки.

Целта на разработката е да се изведе аналитична зависимост за определяне на коефициента на еластичност на ПГ в радиално направление от геометричните параметри на страницата и механичните свойства на материалите.

2. Същност на разработката

Радиална еластичност от действието на вътрешното налягане

Изменението на профила на напречното сечение на ПГ под действието на вътрешното налягане p е представено на фиг. 1. С точките B , C и D върху фигурата са означени съответно краят на борта, изпъкналата част на страницата и началото протектора (раменната зона на гумата), а φ_D е меридианният ъгъл между кордната нишка и координатата r . Определянето на удължаването на страницата от т. B до т. D под действие на вътрешното налягане p се основава на теорията на мрежестите структури [2], [8], от което следва

$$(1) \quad z = \int_r^{r_D} \frac{A}{\sqrt{B^2 - A^2}} dr,$$

където

$$(2) \quad A = \sin \varphi_D (r^2 - r_C^2); \quad B = r_D^2 - r_C^2.$$

Следователно, координатата на т. B и дължината L на кордните нишки в зоната от т. B до т. D , са съответно

$$(3) \quad z_B = \int_{r_B}^{r_D} \frac{A}{\sqrt{B^2 - A^2}} dr; \quad L = \int_{r_B}^{r_D} \frac{B}{\sqrt{B^2 - A^2}} dr.$$

Силата на опън в кордната нишка от каркаса на гумата се определя от условието

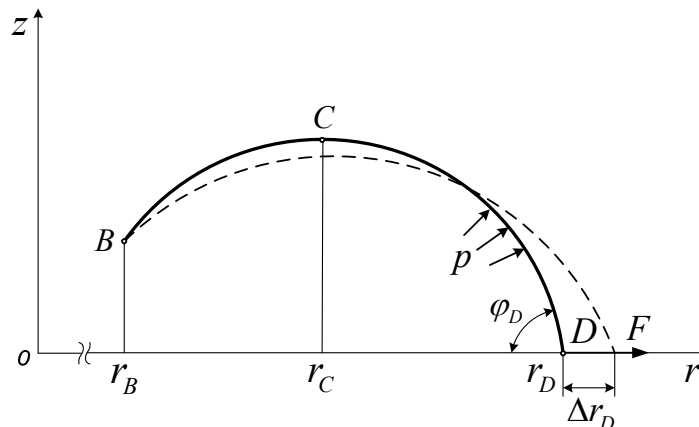
$$(4) \quad t = \frac{\pi p(r_D^2 - r_C^2)}{n \sin \varphi_D},$$

където n е броят на радиално разположените кордни нишки в страницата на ПГ.

Елементарните премествания на характерните точки от профила на страницата Δr_D , Δr_C и на ъгъла $\Delta \varphi_D$ предизвикват съответни изменения на нейните геометрични параметри, които се определят от изразите

$$(5) \quad \Delta z_B = \frac{\partial z_B}{\partial r_C} \Delta r_C + \frac{\partial z_B}{\partial \varphi_D} \Delta \varphi_D + \frac{\partial z_B}{\partial r_D} \Delta r_D;$$

$$(6) \quad \Delta L = \frac{\partial L}{\partial r_C} \Delta r_C + \frac{\partial L}{\partial \varphi_D} \Delta \varphi_D + \frac{\partial L}{\partial r_D} \Delta r_D.$$



Фиг.1. Схема на изменение на напречното сечение на гумата под действие на вътрешното налягане

Като се вземат предвид граничните условия за страницата, т. е. за т. B преместването $\Delta z_B = 0$ и неразтегливостта на кордните нишки $\Delta L = 0$, решенията на уравнения (5) и (6) по отношение на преместването Δr_D са, както следва

$$(7) \quad \Delta r_C / \Delta r_D = U; \quad \Delta \varphi_D / \Delta r_D = V.$$

Радиалната сила F , приложена в края на всяка кордна нишка (т. D на фиг. 1) зависи от изменението на хоризонталната компонента ΔH на силата на опън в нишката, т. е.

$$(8) \quad F = \Delta H = \left(\frac{\partial H}{\partial r_C} U + \frac{\partial H}{\partial \varphi_D} V + \frac{\partial H}{\partial r_D} \right) \Delta r_D,$$

където

$$(9) \quad H = t \cos \varphi_D = (\pi p / n)(r_D^2 - r_C^2) \cot g \varphi_D.$$

Коефициентът на радиална еластичност вследствие действието на вътрешното налягане в ПГ (усилието в каркасите кордни нишки) на единица дължина от периферията на страницата е

$$c_r(c) = \frac{F}{\Delta r_D} \frac{2n}{2\pi r_B}, \quad N/m^2. \quad (10)$$

Цифрата «2» в уравнението показва, че коефициентът $c_r(c)$ се отнася за двете страници на гумата.

Радиална еластичност от гуменокордната структура на стената на страницата

Гуменокордният композит в състава на страниците на ПГ се характеризира с анизотропните си свойства, които се определят от разликата в деформациите на кордните нишки и каучука. Дебелинатата на стената на страниците също оказва влияние върху радиалната еластичност на гумата.

Потенциална енергия от огъването на гуменокордната стена

Кривината k на профила на страницата от напречното сечение на гумата се определя като се използват уравнения (1) и (2), откъдето

$$(11) \quad k = \frac{1}{B} \frac{dA}{dr} = \frac{2r \sin \varphi_D}{r_D^2 - r_C^2}.$$

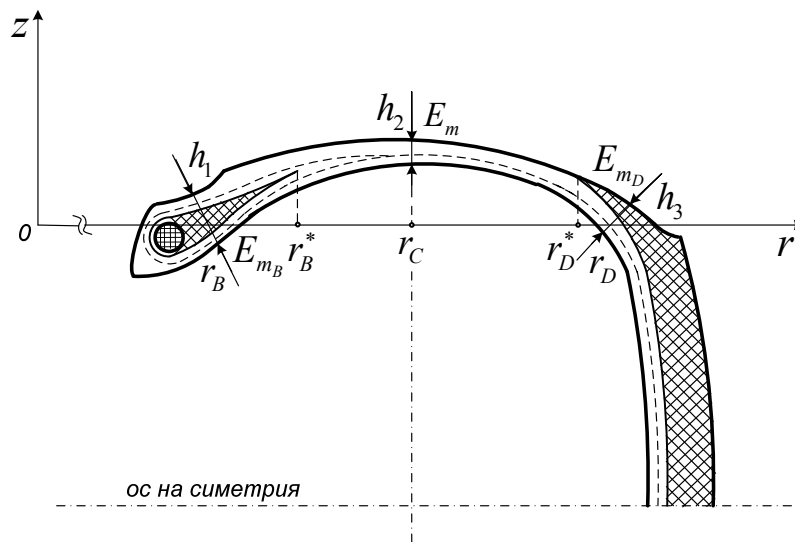
Увеличаването на радиалното преместване Δr_D предизвиква съответно изменение Δk на кривината на профила на страницата, което се определя от израза

$$(12) \quad \Delta k = \left(\frac{\partial k}{\partial r_C} + \frac{\partial k}{\partial \varphi_D} + \frac{\partial k}{\partial r_D} \right) \Delta r_D = \eta \Delta r_D.$$

Потенциалната енергия от огъването на гуменокордния сегмент от страницата е

$$(13) \quad U_B = \frac{1}{2} \int_{r_B}^{r_D} D_\varphi (\Delta k)^2 ds, J,$$

където $D_\varphi = (E_m h^3 r \Delta \theta) / [3(1 - \nu_m^2)]$ е устойчивостта срещу огъване на сегмента в меридианно направление; E_m - модулът на линейна еластичност на материала; ν_m - коефициентът на Поасон; $\Delta \theta$ - ъгълът между две съседни кордни нишки в каркаса; h - дебелина на стената на страницата в зависимост от изменението на координата r . Някои от цитираните параметри за характерни точки от равновесното положение на страницата са показани на схемата на профила на ПГ от фиг. 2.



Фиг.2. Профил на напречното сечение на радиална пневматична гума

Сегментът от страницата е приет за неразтеглив елемент, където с E_{m_B} и E_{m_D} са означени модулите на линейна еластичност в областта, съответно на т. B и т. D . Поради по-голямата плътност на вулканизирания каучук в бортовата и раменната зона на гумата стойностите на модулите E_{m_B} и E_{m_D} са по-големи, отколкото на E_m в средната част на страницата.

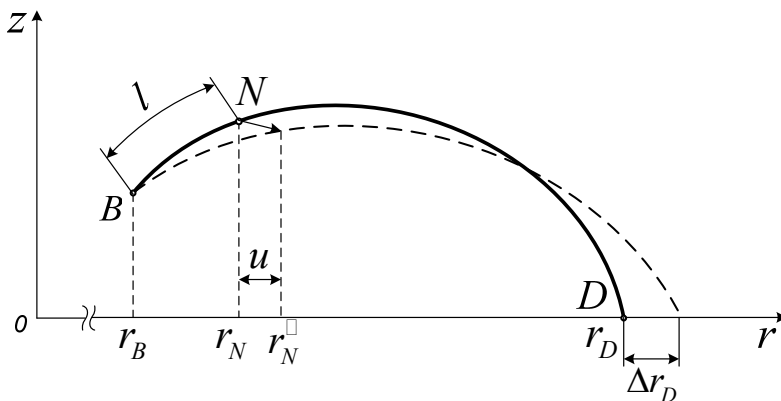
Потенциална енергия от опън на гуменокордната стена

Преместването u на произволна точка N върху страницата в радиално направление е резултат от действието на опънова сила. На схемата от фиг. 3 с l е означена дължината на кордна нишка от каркаса на гумата между т. B върху борта и избраната т. N . Дължината се определя от интеграла

$$(14) \quad l = \int_{r_B}^{r_N} \frac{B}{\sqrt{B^2 - A^2}} dr.$$

Условието за неразтегливост на кордните нишки е

$$(15) \quad \Delta l = \left(\frac{\partial l}{\partial r_C} U + \frac{\partial l}{\partial \varphi_D} V + \frac{\partial l}{\partial r_D} + \frac{\partial l}{\partial r_N} \frac{\partial r_N}{\partial r_D} \right) \Delta r_D = 0.$$



Фиг.3. Схема на радиално преместване на точка от страницата на гумата

В този случай за преместването се получава

$$(16) \quad u = \Delta r_N = - \left(\frac{\partial l}{\partial r_C} U + \frac{\partial l}{\partial \varphi_D} V + \frac{\partial l}{\partial r_D} \right) \Delta r_D / \left(\frac{\partial l}{\partial r_N} \right) = \xi \Delta r_D.$$

Уравнение (16) трябва да удовлетворява следните гранични условия: $u = 0$ при $u_N = u_B$ и $u = \Delta r_D$ при $u_N = u_D$.

Следователно потенциалната енергия от опън на гуменокордния сегмент от страницата е

$$(17) \quad U_S = \frac{1}{2} \int_{r_B}^{r_D} C_\theta (u/r)^2 ds, J,$$

където $C_\theta = (E_m hr \Delta \theta) / [V_m (1 - \nu_m^2)]$ е устойчивостта срещу опън на сегмента в периферно направление; V_m - обемът на сегмента.

Работа от радиалната сила F

Работата, която извършва радиалната сила F при разтягане на сегмента от страницата е $A_p = F\Delta r_D$, където $F = qr_B\Delta\theta$. Съгласно принципа за минимум на потенциалната енергия за разглежданата система трябва да е изпълнено условието $U_B + U_S - A_p$ по отношение на изменението Δr_D , от което се получава

$$(18) \quad q = \frac{\Delta r_D}{r_B} \int_{r_B}^{r_D} \left[\frac{E_m h^3 r}{3(1-\nu_m^2)} \eta^2 + \frac{E_m h}{V_m(1-\nu_m^2)} \xi^2 \right] ds.$$

Коефициентът на радиална еластичност, зависещ от структурата на страниците на ПГ е

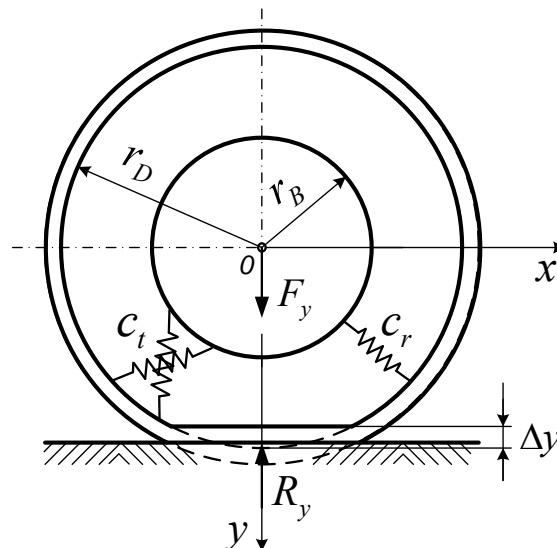
$$(19) \quad c_r(r) = \frac{2q}{\Delta r_D}, \quad N/m^2.$$

Сумарният коефициент на радиална еластичност на единица дължина от периферията на страниците се определя от израза

$$(20) \quad c_r = c_r(c) + c_r(r), \quad N/m^2.$$

3. Експериментални и числени резултати

Непосредственото експериментално измерване на радиалната еластичност на ПГ е затруднено. В такива случаи обикновено се прилага индиректен метод за определяне на коефициента c_r . Най-напред се изчислява нормалната еластична константа по формулата $c_\Delta = F_y / (\pi r_B \Delta y)$, където F_y и Δy са съответно вертикалното натоварване върху колелото и деформацията на гумата, както е показано на фиг. 4. След това чрез разликата $c_\Delta - c_t = c_r$ се определя коефициентът на радиална еластичност, където c_t е тангенциалната еластичност на гумата [3]. Натурният експеримент е проведен с радиална ПГ от типоразмер 245/70 R 16 Н.



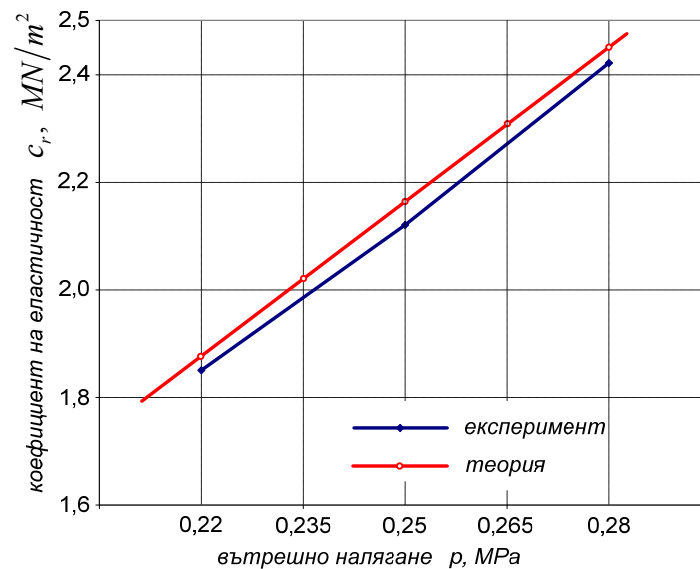
Фиг.4. Схема на еластичен модел на страницата на гумата под действие на радиално натоварване

От особена важност за получаване на реално значими резултати при провеждане на числен експеримент, е избирането на необходимите входни параметри за обекта на изследването. Специфичните особености на корда и каучука затрудняват точното определяне на механичните свойства на каркасно-кордната структура на страницата.

Модулите на еластичност на композитната структура зависят от броя и дебелината на кордните и гумените слоеве, броят на нишките на единица дължина от напречното сечение и ъгъла на наклона на нишките в отделните слоеве [4], [7], [9].

Необходимите входни параметри за провеждане на изчислителната процедура са избрани за същия типоразмер гума. Геометричните размери на профила на напречното сечение на гумата в съответствие с означенията от схемата на фиг. 2 са следните: $r_B = 0,218 \text{ m}$; $r_C = 0,288 \text{ m}$; $r_D = 343 \text{ m}$; $\varphi_D = 38^\circ$ ($0,663 \text{ rad}$); $r_B^* = 0,260 \text{ m}$; $r_D^* = 0,328 \text{ m}$; $h_1 = 0,0175 \text{ m}$; $h_2 = 0,0095 \text{ m}$; $h_3 = 0,0125 \text{ m}$. Стойностите на модулите на еластичност в избраните точки от страницата са, съответно: $E_m = 320 \text{ MPa}$; $E_{m_B} = 1700 \text{ MPa}$; $E_{m_D} = 460 \text{ MPa}$.

На фиг. 5 е показано графично сравнение между изчислените и експериментално получени стойности на коефициента на радиална еластичност c_r , от изменението на вътрешното налягане p .



Фиг.5. Зависимост на коефициента на радиална еластичност от вътрешното налягане в гумата

4. Заключение

Чрез използване теорията на мрежестите структури е извършен анализ на радиалната еластична константа на страницата на ПГ с радиална конструкция. Получените резултати показват добро съгласуване между пресметнатите и експерименталните стойности на коефициента на радиална еластичност на страниците за конкретен типоразмер гума. Подходът може да бъде приложен за изследване на еластичността на брекерния пояс на радиални гуми.

Литература

- [1]. Бухин Б. Л. Введение в механику пневматических шин. М., Химия, 1988. 223 с.
- [2]. Григолюк Э. И., Г. М. Куликов. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин. М., Машиностроение, 1988. 288 с.
- [3]. Исследование вибрационных характеристик системы "шина – подвеска" с целью повышения комфортабельности легковых автомобилей высшего класса "ЗИЛ". Технически отчет по Договор №38 – 70/1116 – 22. Москва – София, 1988. 271 с.

- [4]. Лукомская А. И. Механические свойства резинокордных систем. М., Химия, 1981. 278 с.
- [5]. Раймпель Й. Шасси автомобиля. Амортизаторы, шины и колеса (перевод с немецкого). М., Машиностроение, 1986. 317 с.
- [6]. A new Analytical Tire Model for Vehicle Dynamic Analysis. J. Shane Sui, John A. Hirshey// Daimler Chrysler Corporation, 2000. 11 p.
- [7]. Clark S. K. Mechanics of pneumatic tires. National Bureau of Standards. Washington, D. C., 1981. 931 p.
- [8]. Konty . Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires. Zlin, CSZ, 2007. 139 p.
- [9]. The Pneumatic Tire. U. S. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration, 2006. 699 p.
- [10]. Zegelaar P. W. A. The Dynamic Response of Tyres to Brake Torque Vibrations and Road unevennesses. Delft University of Technology, 1998. 316 p.

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE PNEUMATIC TIRE RADIAL STIFFNESS

Penko Tzvetkov Petkov
tt@vtu.bg

***Department „Transport Technique”
Todor Kableshkov University of Transport,
158 Geo Milev Street, Sofia,
BULGARIA***

Key words: *pneumatic tire, sidewall, composite structure, internal pressure, elastic module, radial stiffness coefficient*

Abstract: *Analytical method for radial stiffness of the pneumatic tire has been offered in the article. The main purpose is to find analytical dependence of the stiffness coefficient in a radial direction on the geometric parameters of the tire sidewall and the mechanical properties of the materials. The method is applied for determined type of size tire with radial construction. The results received have been compared with experimental ones and they can be used in theoretical models for the vibration activity of the tire investigation.*