

УДК 629.3.032

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ І ПОБУДОВИ ТЯГОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКРЕМОГО КОЛЕСА З ПНЕВМАТИЧНОЮ ШИНОЮ

М.М. Балака, асист.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація. Розроблено методику розрахунку тягово-зчіпних властивостей окремого колеса з пневматичною шиною, яка дозволяє побудувати теоретичну тягову характеристику з урахуванням геометричних та робочих параметрів шини і фізико-механічних властивостей ґрунту.

Ключові слова: колесо, пневматична шина, ґрунт, тягова характеристика.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДИНОЧНОГО КОЛЕСА С ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНОЙ

М.Н. Балака, ассист.,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Аннотация. Разработана методика расчета тягово-сцепных свойств одиночного колеса с пневматической шиной, которая позволяет построить теоретическую тяговую характеристику с учетом геометрических и рабочих параметров шины и физико-механических свойств ґрунта.

Ключевые слова: колесо, пневматическая шина, ґрунт, тяговая характеристика.

METHODOLOGY OF CALCULATION AND CONSTRUCTION OF THE TRACTION CHARACTERISTIC FOR A SINGLE WHEEL WITH PNEUMATIC TYRE

M. Balaka, T. Asst.,
Kyiv National University of Construction and Architecture

Abstract. Calculation methodology of the traction-clutch qualities for a single wheel with pneumatic tyre is developed. It allows you to construct a theoretical traction characteristic, taking into account the geometric and operating parameters of the tyre and the physical-mechanical properties of the soil.

Key words: wheel, pneumatic tyre, soil, traction characteristic.

Вступ

Тягова характеристика є основним технічним документом самохідних колісних землерийно-транспортних і навантажувальних машин, що здійснюють подолання опорів на робочих органах при їх взаємодії з ґрунтом за рахунок сили тяги, яку створює колісний рушій.

У графічній формі тягова характеристика визначає тягово-зчіпні й паливно-економічні показники машини, дозволяє провести оцінку останніх за критерієм узагальненого енергетичного потенціалу продуктивності [1] та розв'язати значний клас задач, пов'язаних з виробничою експлуатацією машин.

Тягова характеристика може бути побудована аналітичним способом на стадії проектування машини або за допомогою експериментальних даних, одержаних під час тягових випробувань відповідно до державних норм.

Аналіз публікацій

Найбільшу складність під час побудови тягової характеристики аналітичним способом на стадії проектування машини викликає метод задання основної залежності тягової характеристики, а саме $\delta = \delta(T)$, де T – сила тяги колісного рушія за зміни від нуля до сили тяги за зчепленням T_{ϕ} , а δ – коефіцієнт буксування рушія за зміни від 0 до 100 %.

На цей час існує два методи задання залежності $\delta = \delta(T)$ у вигляді:

- емпіричних залежностей, в яких постійні коефіцієнти, що їх визначають, одержані шляхом обробки результатів експериментальних досліджень процесів взаємодії рушія машини з опорною поверхнею [2];
- аналітичних залежностей, які дозволяють проаналізувати вплив параметрів опорної поверхні та рушія на характер зміни процесу, що досліджується [3].

У роботі [3] вперше в аналітичному вигляді було запропоновано, а в [4] уточнено основну залежність тягової характеристики колісного рушія $\delta = \delta(T)$. Що стосується інших параметрів – поступальної швидкості руху колеса $V_{\text{кд}}$, тягової потужності N_T і тягового коефіцієнта корисної дії η_T , – то вони визначались за відомими методами тягової механіки [5]. Варто підкреслити, що процес взаємодії великогабаритних пневматичних шин (для землерийно-транспортних машин підвищеної одиничної потужності) з деформівною опорною поверхнею має ряд особливостей: по-перше, значні геометричні розміри області контакту потребують більш точного дослідження напружено-деформованого стану; а по-друге, нелінійний характер змін механічних властивостей шини за збільшення її розмірів не завжди дозволяє застосовувати методи теорії подібності для використання характеристик шин менших розмірів [6, 7].

Мета і постановка завдання

Метою роботи є розробка методики розрахунку і побудови тягової характеристики колеса з великогабаритною пневматичною шиною, що дозволить оцінити його тягово-зчпні властивості під час руху по деформівних ґрунтах.

Модель взаємодії «ведуче колесо – ґрунт»

Для аналітичного опису взаємодії великогабаритної пневматичної шини з ґрунтом на ведучому режимі роботи колеса розроблено математичну модель, що складається з двох контактуючих тіл, які одночасно деформуються в радіальному напрямку до осі колеса [4].

Деформованість шини подано паралельним з'єднанням фундаментальних тіл Гука, Ньютона і Сен-Венана, що відображають від-

повідно пружні властивості шини і враховують наявність обох видів внутрішнього тертя (в'язкого і сухого) у матеріалах гумокордної оболонки. Деформованість ґрунту відображає модель Кельвіна–Фойгта у вигляді паралельно розташованих тіл Гука і Ньютона (рис. 1).

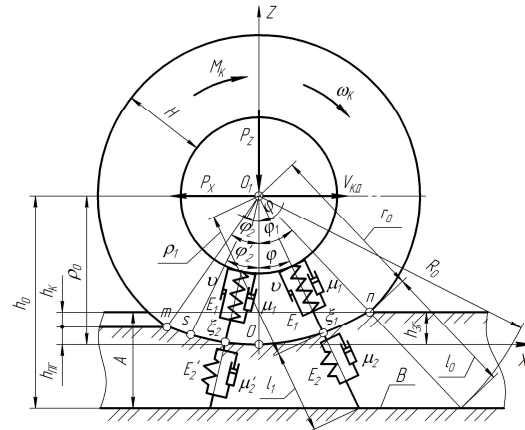


Рис. 1. Схема взаємодії пневматичної шини з ґрунтом під час кочення колеса

На рис. 1 позначено: P_z , P_x , M_k – вертикальне і горизонтальне навантаження, крутний момент на колесі; ω_k , $V_{\text{кд}}$ – кутова та дійсна поступальна швидкість колеса (точки O_1); r_0 , H , h_k , $h_{3Г}$, $h_{ПГ}$ – геометричні розміри шини (вільний радіус і висота профілю), величини колі та деформацій ґрунту (загальної й пружної) в центральній поздовжній площині кочення колеса; ϕ , ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ'_2 – кути контакту шини з ґрунтом відповідно в довільних точках ξ , в точках звантаження n , розвантаження m і виходу протектора шини s ; h_0 , l_0 , l_1 , l_2 – лінійні розміри; ρ_0 , ρ_1 , ρ_2 – полярні радіуси центральної опорної точки O і довільних точок ξ ; E_1 , μ_1 – модуль деформації та коефіцієнт в'язкості шини; E_2 , μ_2 , E'_2 , μ'_2 – модулі деформації та коефіцієнти в'язкості ґрунту в зонах звантаження (nO) і розвантаження (Os); ν – коефіцієнт, що показує, яку частину модуля деформації шини складають контактні напруження, зумовлені постійним внутрішнім тертям у шині; A – деформівний шар ґрунту; B – твердий підстильний шар ґрунту.

Розроблена модель одночасно враховує вплив параметрів деформованості шини і ґрунту, зовнішнього тертя гуми та сил опору ґрунту зсуву по упорних поверхнях протектора на тягово-зчпні властивості рушія (рис. 2).

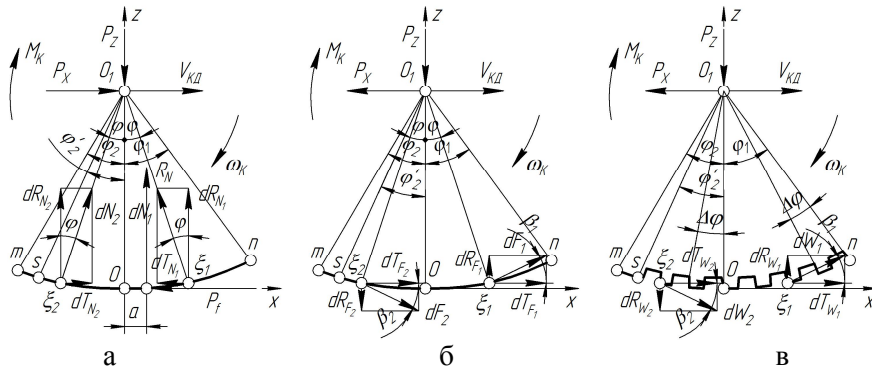


Рис. 2. Схеми для визначення рівноваги системи «колесо з пневматичною шиною – ґрунт» з урахуванням: а – радіального деформування моделей шини і ґрунту; б – сил тертя гуми виступів протектора шини по ґрунту; в – упорних реакцій на ґрунтозачепах протектора шини

Величини з нижнім індексом «1» відповідають зоні завантаження (nO), а з індексом «2» – зоні розвантаження (Os). На рис. 2 позначено: dN , dF , dW – елементарні радіальна реакція ґрунту, дотична сила тертя шини по ґрунту та упорна реакція на ґрунтозачепах; dR_N , dT_N , dR_F , dT_F , dR_W , dT_W – проекції dN , dF і dW на осі Z та X ; P_f – сила опору коченню колеса; a – поздовжній знос нормальної реакції R_N ; β – кут між елементарною реакцією та її проекцією на вісь X ; $\Delta\varphi = 2\pi / z_{ГЗ}$ – центральний кут ґрунтозачепа ($z_{ГЗ}$ – кількість ґрунтозачепів протектора).

Рівняння рівноваги у проекціях діючих сил і реакцій на осі Z і X мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 P_Z &= R_{N_{1,2}} + R_{F_{1,2}} + R_{W_{1,2}} = \\
 &= B_{\Pi} \left(\int_0^{\varphi_1} \sigma_1 \rho_1 \cos \varphi d\varphi + \int_0^{\varphi_2} \sigma_2 \rho_2 \cos \varphi d\varphi \right) + \\
 &+ k_H B_{\Pi} \left(\int_0^{\varphi_1} \mu_{C1} \sigma_1 \rho_1 \sin \beta_1 d\varphi - \int_0^{\varphi_2} \mu_{C2} \sigma_2 \rho_2 \sin \beta_2 d\varphi \right) + \\
 &+ \sum_{i=1}^{z'_{ГЗ1}} W_{ГЗi} \sin \beta_{1i} - \sum_{i=1}^{z'_{ГЗ2}} W_{ГЗi} \sin \beta_{2i}; \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_X &= T_{N_{1,2}} + T_{F_{1,2}} + T_{W_{1,2}} = \\
 &= B_{\Pi} \left(- \int_0^{\varphi_1} \sigma_1 \rho_1 \sin \varphi d\varphi + \int_0^{\varphi_2} \sigma_2 \rho_2 \sin \varphi d\varphi \right) + \\
 &+ k_H B_{\Pi} \left(\int_0^{\varphi_1} \mu_{C1} \sigma_1 \rho_1 \cos \beta_1 d\varphi + \int_0^{\varphi_2} \mu_{C2} \sigma_2 \rho_2 \cos \beta_2 d\varphi \right) + \\
 &+ \sum_{i=1}^{z'_{ГЗ1}} W_{ГЗi} \cos \beta_{1i} + \sum_{i=1}^{z'_{ГЗ2}} W_{ГЗi} \cos \beta_{2i}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

де σ – нормальні контактні напруження в довільній точці ξ контакту шини з ґрунтом; μ_C – коефіцієнт тертя ковзання гуми виступів протектора по ґрунту в точці ξ ; $W_{ГЗi}$ – упорна реакція ґрунту на i -му ґрунтозачепі; k_H – коефіцієнт насиченості рисунка протектора; B_{Π} – ширина протектора; $Z'_{ГЗ}$ – кількість ґрунтозачепів у контакті.

Слід зазначити, що складова $T_{N_{1,2}}$ відповідає силі опору коченню колеса P_f , а складові $T_{F_{1,2}} + T_{W_{1,2}}$ – силі тяги T , яку створює рушій. У безрозмірній формі вони мають вигляд

$$f_k = P_f / P_Z; \quad (3)$$

$$\psi = T / P_Z \text{ або } \psi_{\max} = \varphi = T_{\varphi} / P_Z, \quad (4)$$

де f_k , φ , T_{φ} – коефіцієнти опору коченню і зчеплення колеса та сила тяги за зчепленням.

Алгоритм розрахунку параметрів тягової характеристики

Значення параметрів зовнішнього тертя гуми протектора шини наведено в роботах [3, 6], параметрів опору ґрунту зсуву – в роботах [2, 8], а значення параметрів деформованості пневматичної шини і ґрунту визначаються на основі аналітичних і експериментальних методів [9].

Розрахунок параметрів тягової характеристики колеса з великогабаритною шиною виконуємо у такій послідовності (рис. 3):

- візьмемо коефіцієнт буксування $\delta = 0$;
- задаємось очікуваним значенням кута φ_1 передньої ділянки контакту шини з ґрунтом в

межах від 20 до 40° з кроком не більше 1° (розрахунок у радіанах, $1^\circ = \pi / 180$ рад);
 – перевіряємо умову рівноваги (1) у проєкціях діючих сил і реакцій на вісь Z під час роботи колеса на ведучому режимі;
 – при виконанні умови рівноваги (1), з точністю $\pm \Delta P_Z = 100$ Н, визначаємо складові $T_{N_{1,2}}$, $T_{F_{1,2}}$ і $T_{W_{1,2}}$ з рівняння рівноваги (2) у проєкціях діючих сил і реакцій на вісь X ;

– в іншому випадку – задаємо таким значенням кута φ_1 і повторюємо розрахунки;
 – послідовно змінюючи значення коефіцієнта буксування δ в діапазоні від 0 до $1,0$ з кроком $0,05$, виконуємо попередні розрахунки;
 – отримуємо значення колової сили P_K , сили опору коченню P_f і сили тяги T ;
 – розраховуємо поступальну швидкість руху колеса $V_{КД}$, тягову потужність N_T і тяговий коефіцієнт корисної дії (ККД) η_T .

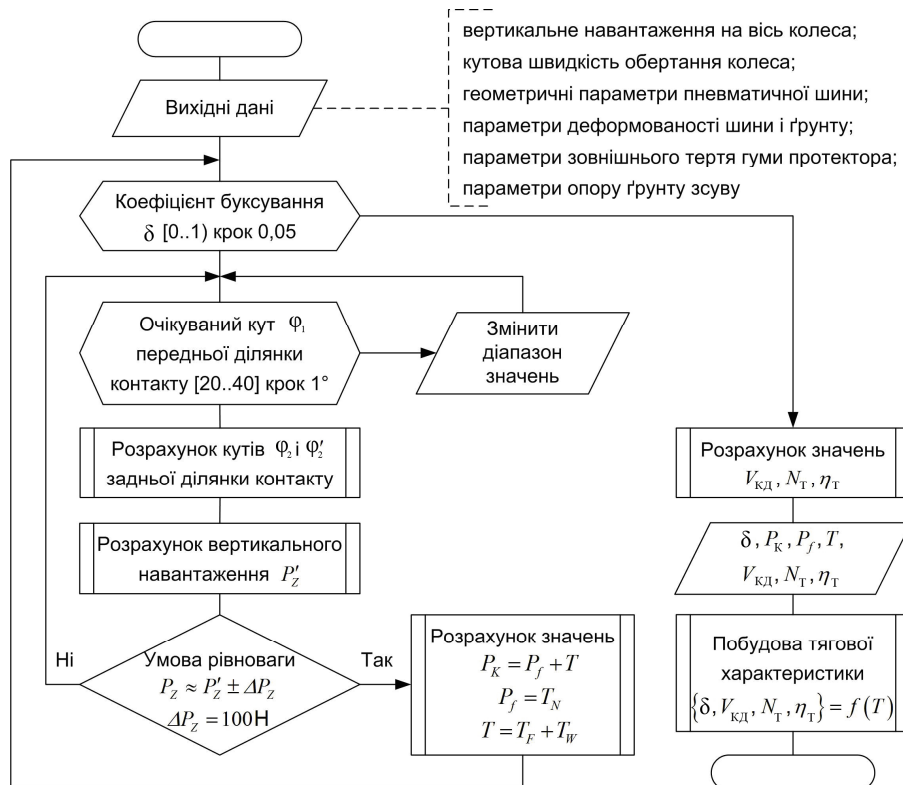


Рис. 3. Блок-схема алгоритму розрахунку параметрів тягової характеристики

Слід зазначити, що розроблену методику орієнтовано на розрахунок тягово-зчіпних властивостей не лише окремого колеса з пневматичною шиною, але й багатоосьового колісного рушія землерийно-транспортних машин із застосуванням відомих методик [3, 6].

Методику адаптовано для використання чисельних методів аналізу. Її реалізовано у вигляді програми «TCQLST» (Traction and Clutch Qualities Large-Sized Tyres) за допомогою системи комп'ютерної алгебри Mathcad [10]. Програма дозволяє отримати графічні залежності δ , $V_{КД}$, N_T , η_T у функції сили тяги T або відносної сили тяги $\psi = T / P_Z$ рушія.

На рис. 4 наведено теоретичну тягову характеристику окремого колеса з пневматичною шиною 27.00-33 моделі В-71 за прямолінійного руху на щільному суглинку за тиску повітря в шині $0,35$ МПа і вертикального навантаження на вісь колеса 78 кН, яку отримано із застосуванням методики розрахунку.

Для оцінки адекватності цієї характеристики на рис. 4 нанесено експериментальні значення, отримані за результатами стендових тягових випробувань окремого колеса з пневматичною шиною [11]. Умови тягових випробувань повністю відповідають розрахунковим.

Аналіз графічних залежностей показав, що розбіжність між результатами теоретичних і

експериментальних досліджень становить для: коефіцієнта зчеплення φ – 5,5 %, максимальних значень тягового ККД $\eta_{T \max}$ і тягової потужності $N_{T \max}$ – 6,8 % і 5,4 % відповідно.

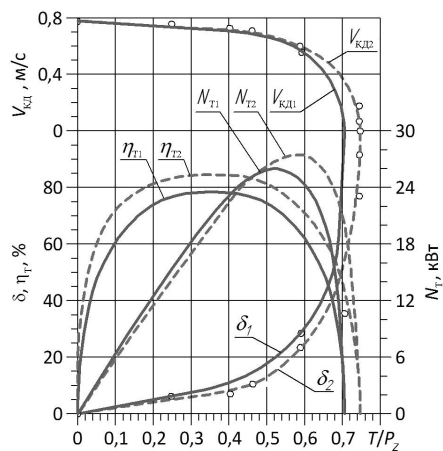


Рис. 4. Тягова характеристика колеса з пневматичною шиною 27.00-33 моделі В-71: 1 – теоретична; 2 – експериментальна

Середньоарифметичне відносної похибки вимірювань для залежностей коефіцієнта буксування δ та дійсної поступальної швидкості руху колеса $V_{\text{кд}}$ у функції відносної сили тяги $\psi = T / P_z$ не перевищує 6,0 %, що можна визнати цілком задовільним.

Висновки

Методика розрахунку тягово-зчіпних властивостей окремого колеса з пневматичною шиною, на основі розробленої математичної моделі, дозволяє побудувати теоретичну тягову характеристику з урахуванням геометричних та робочих параметрів шини і фізико-механічних властивостей ґрунту, що сприятиме підбору оптимальних характеристик пневматичних шин під час проектування самохідних колісних землерійно-транспортних машин.

Література

1. Гинзбург Ю.В. Промышленные тракторы / Ю.В. Гинзбург, А.И. Швед, А.П. Парфенов. – М.: Машиностроение, 1986. – 296 с.
2. Ульянов Н.А. Самоходные колесные землеройно-транспортные машины / Н.А. Ульянов, Э.Г. Ронинсон, В. Г. Соловьев. – М.: Машиностроение, 1976. – 360 с.
3. Щербинин М. И. Исследование тяговых качеств колесного движителя на дефор-

мируемых грунтах : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.05.04 «Дорожные и строительные машины» / М.И. Щербинин. – Воронеж, 1979. – 24 с.

4. Пелевин Л.Е. Силовое взаимодействие эластичного колеса с деформирующейся опорной средой / Л.Е. Пелевин, М.Н. Балака, Г.А. Аржаев // Интерстроймех-2007: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 11–14 сент. 2007 г. – Самара: СГАСУ, 2007. – С. 205–209.
5. Тракторы. Теория / В.В. Гуськов, Н.Н. Велев, Ю.Е. Атаманов и др.; под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
6. Ульянов Н.А. Колесные движители строительных и дорожных машин / Н.А. Ульянов. – М.: Машиностроение, 1982. – 280 с.
7. Скорняков Э.С. Крупногабаритные шины автомобилей и тракторов : монография / Э.С. Скорняков. – Днепропетровск: Пороги, 2000. – 264 с.
8. Бабков В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: Высш. шк., 1976. – 243 с.
9. Пелевин Л.Е. Визначення параметрів реологічних моделей системи «пневматична шина – опорна поверхня, що деформується» / Л.Е. Пелевін, М.М. Балака, Г.О. Аржаєв // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., 29–31 трав. 2012 р. – Херсон : ХДМА, 2012. – Т. 1. – С. 48–53.
10. Моделирование процесса взаимодействия эластичного колеса с деформируемой опорной поверхностью / Л.Е. Пелевин, Ю.Д. Абрашкевич, М.Н. Балака, Г.А. Аржаев // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 7. – С. 10–16.
11. Експериментальні дослідження роботи колеса з пневматичною шиною на опорній поверхні, що деформується / М.М. Балака, Л.Е. Пелевін, Г.О. Аржаєв, А.В. Василенко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 1(8). – С. 132–139.

Рецензент: І.Г. Кириченко, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 19 березня 2016 р.