

УДК 631.372

## ВИЗНАЧЕННЯ ДІЙСНОГО РАДІУСУ КОЧЕННЯ ПНЕВМАТИЧНИХ КОЛІС

Г. А. Голуб, В. В. Чуба

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Кореспонденція авторів: gagolub@ukr.net, vvchuba@ukr.net.

Історія статті: отримано – січень 2018, акцентовано – травень 2019.

Бібл. 11, рис. 4, табл. 2.

**Анотація.** Отримані результати дають змогу виконати розрахунок дійсного радіуса кочення колеса коліс самохідних машин відповідно до тиску повітря в шинах та параметрів взаємодії з опорною поверхнею.

На основі розробленої моделі для визначення початкового радіуса колеса та довжини зони контакту колеса з опорною поверхнею отримано залежність для визначення дійсного радіуса кочення колеса.

Виконані дослідження підтвердили збільшення дійсного радіуса кочення при збільшенні тиску повітря в шинах. Так, наприклад, для заднього колеса трактора John Deere 7130 при збільшенні тиску від 0,6 до 2,6 атм спостерігалось збільшення радіуса кочення на 21 мм. Для переднього колеса при зміні тиску від 1 до 2 атм спостерігалось збільшення радіуса кочення на 7 мм. Індекс детермінації розрахункових та експериментальних значень дійсного радіуса кочення становить  $\eta^2 = 0,98$  для передніх та  $\eta^2 = 0,99$  для задніх коліс, що свідчить про адекватність отриманих розрахункових залежностей.

**Ключові слова:** радіус кочення колеса, деформація колеса, тиск повітря в шині, зона контакту колеса з опорною поверхнею.

### Постановка проблеми

У більшості досліджень, що стосувалися руху колісних рушіїв, які виконані в середині минулого століття, приймався статичний радіус кочення колеса [1]. Проте такий підхід справедливий тільки для коліс, що не піддаються деформації.

Сучасні дослідження механіки взаємодії привідного колеса та опорної поверхні направлені на удосконалення технічних засобів та систем керування оптимальними режимами руху самохідних машин [2]. Подібні системи вимагають виконання точних вимірювань та отримання мінімальних похибок під час розрахунків.

Радіус кочення колеса є важливим параметром, оскільки він визначає показники взаємодії колеса із опорною поверхнею при перетворенні потужності двигуна в тягову силу.

На сьогодні відсутній єдиний підхід до визначення дійсного радіуса кочення пневматичних коліс під час руху самохідних машин.

### Аналіз останніх досліджень

У роботі [3], при дослідженні взаємодії шини з ґрунтом на тягові властивості сільськогосподарських енергозасобів, наголошується про необхідність визначення дійсного радіуса кочення колеса. Авторами розглянута можливість визначення дійсного радіуса кочення колеса на основі проведення тестів перекочування самохідної машини на різному ґрунтовому фоні. Було встановлено, що існує різниця в значеннях радіуса кочення колеса при наявності тягового навантаження та без нього.

Досліджувався також процес перекочування привідного колеса з пневматичною шиною на ґрунті, що зазнає деформацію [4]. На основі проведених досліджень, виділено три радіуси кочення колеса, а саме: кінематичний радіус, який виникає в результаті існування ковзання (буксування) колеса; кінетичний радіус, який обчислюється із співвідношенням крутного моменту та приведеної сили опору переміщення колеса та геометричний радіус – як відстань між центром колеса і нижньою частиною шини. Автор відмічає неспівпадіння та взаємозалежність зазначених радіусів.

У роботі [5] розглянуті теоретичні підходи та виконано експериментальні дослідження по визначенню кінематичного та кінетичного радіусу із застосуванням сучасних вимірювальних засобів. Було встановлено розбіжність експериментально отриманих радіусів із статичним радіусом колеса. Автори допустили можливість застосування статичного радіуса колеса для виконання моделювання зміни показників взаємодії колеса із опорною поверхнею.

Запропоновані в роботах [4, 5] методичні підходи для визначення радіуса кочення колеса дозволяють вирішувати задачі взаємодії колеса з ґрунтом із відповідними похибками, проте для широкого використання ці підходи потребують подальшого удосконалення.

На сьогодні виконано певна кількість досліджень які базуються на емпіричних залежностях, отриманих при різних умовах взаємодії привідного колеса та опорної поверхні.

За даними [6] дійсний радіус кочення колеса пропонується розраховувати наступним чином:

$$R_D = \frac{2}{3}R_u + \frac{1}{2}R_l \quad (1)$$

де  $R_D$  – дійсний радіус кочення колеса, м;  
 $R_u$  – радіус колеса без навантаження, м;  
 $R_l$  – радіус навантаженого колеса, м.

У роботі [7] дійсний радіус кочення колеса пропонується визначати за допомогою напівемпіричної залежності:

$$R_D = R_U - \rho_0 \left[ D \arctan \left( B \frac{\rho}{\rho_0} \right) + E \frac{\rho}{\rho_0} \right] \quad (2)$$

де  $\rho$  – дійсний прогин шини, м;  
 $\rho_0$  – прогин шини при номінальному навантаженні, м

$B$ ,  $D$ ,  $E$  – конструктивні параметри шини, які характеризують параметри шини пов'язані із характером деформації шини при навантаженні, від. од.

У роботі [8], для визначення дійсного радіусу кочення в залежності від привідного крутного моменту, навантаження та тиску, було запропоновано залежність на основі емпіричних коефіцієнтів:

$$R_D = R_U - \lambda^* \left[ 1 - (1 - W/W^*) p / p^* \right] T \quad (3)$$

де  $W$  – вертикальне навантаження на колесо, Н;  
 $p_w$  – тиск в колесі, кПа;  
 $T$  – крутний момент прикладений до колеса, Н м;  
 $\lambda^*$ ,  $W^*$ ,  $p^*$  – емпіричні фактори продольної еластичності шини, навантаження та тиску відповідно.

Застосування наведених залежностей, а також їм подібних, дають змогу виконати орієнтовний розрахунок зміни дійсного радіусу кочення колеса, але при практичному використанні можуть призводити до суттєвих похибок.

У роботі [9], на основі застосування сучасних GPS технологій, автори розглянули можливість застосування оперативного контролю за тиском в шині на основі зміни дійсного радіусу кочення. Дійсний радіус кочення запропоновано визначати виходячи із відношення лінійної швидкості транспортного засобу та кутової швидкості обертання колеса. Даний підхід дозволяє фіксувати зміну радіуса лише у випадку відсутності зміни крутного моменту та відсутності ковзання колеса. В реальних умовах завжди буде присутнє ковзання, змінна деформація за рахунок приведенного крутного моменту та ковзання колеса.

У роботі [10] для експериментального визначення кутової швидкості колеса використано датчики АБС. При заданій швидкості переміщення та при вимірюваному за допомогою лазерної лінійки радіуса колеса, було визначено фактичну жорсткість шини. Запропоновано застосування чутливої електронної системи визначення зміни положення центру мас [11]. Це дозволяло фіксувати деформацію колеса в залежності від прикладеного до нього динамічного навантаження. Такий підхід дозволяє визначити жорсткість колеса на основі зміни дійсного радіуса колеса.

Аналіз досліджень [10, 11] показує перспективність застосування різних способів для визначення ковзання колеса, що дозволяє

опосередковано робити висновки про зміну дійсного радіусу кочення колеса. Практичну цінність застосування проаналізованих методів можна отримати тільки у випадку визначення величини миттєвого дійсного радіусу кочення, але для цього необхідно задаватися початковим значенням дійсного радіусу кочення.

Виконаний аналіз існуючих публікацій показав відсутність єдиного підходу та методики у визначенні дійсного радіусу кочення колеса під час взаємодії колеса із опорною поверхнею. Також слід відмітити різноманітний вплив багатьох параметрів взаємодії колеса та опорної поверхні на дійсний радіус кочення колеса. Неможливість визначити дійсний радіус кочення призводить до суттєвих помилок при інтерпретації експериментальних та теоретичних досліджень роботи коліс. Встановлення дійсного радіусу кочення колеса дасть змогу визначити тягову силу та ковзання колеса. Уточнення методики визначення початкового радіусу кочення пневматичного колеса в залежності від його конструкційних параметрів, є актуальним науковим завданням.

## Мета досліджень

Обґрунтувати умови та методику визначення дійсного радіусу кочення пневматичних приводних коліс самохідних машин при деформації від вертикально прикладеного навантаження.

## Результати досліджень

При обґрунтуванні методики та визначенні початкового та дійсного радіуса кочення приводних коліс використовувалося геометричне моделювання деформації пневматичного колеса. Виконано експериментальне дослідження зміни геометричних параметрів шин трактора John Deere серії 7130 від зміни тиску в шині. При проведенні експериментальних досліджень трактор був обладнаний передніми Goodyear Super Traction Radial 14.9 R24 та задніми Firestone Radial 800 460/85 R38 шинами.

Довжину кола шини по центру та краю протектора визначали при заданому тиску в шині для піднятого колеса (при відсутності навантаження). Хорда зони контакту колеса із опорною поверхнею при навантаженні вагою трактора вимірювалася при різному тиску в шинах.

Для перевірки достовірності отриманих теоретичних залежностей виконувалося експериментальна перевірка зміни дійсного радіусу кочення коліс трактора при зміні тиску в шинах та при переміщенні по горизонтальному бетонному майданчику. При визначенні дійсного радіусу кочення встановлювався необхідний тиск в шині та здійснювалося перекочування на відстань 10 повних обертів колеса. Під час перекочування фіксували шлях пройдений колесом за один оберт та загальний пройдений шлях. Після виконання 10 обертів,

виконувалося усереднення шляху, що проходить колесо за один оберт. По середньому шляху пройденому за один оберт колеса визначався дійсний радіус кочення колеса. Достовірність отриманих теоретично та експериментально дійсних радіусів кочення виконано за допомогою порівняння ковзання колеса відносно початкового радіуса колеса.

При русі колісних тракторів, автомобілів та інших самохідних машин відбувається деформація шин коліс завдяки дії приведенного вертикального навантаження та дії крутного моменту підведеного до колеса.

Із-за деформації шин коліс, фактичний шлях, що проходить колесо є меншим, ніж пройшло б це колесо при відсутності деформації шини. Таким чином деформація колеса вносить свою частку в загальне ковзання колеса.

Більшість дослідників розглядають явище ковзання як відношення різниці лінійної та дійсної швидкості колеса до лінійної або відношення різниці можливого та пройденого шляху до можливого:

$$\delta = \frac{\omega R_K - V_D}{\omega R_K} = \frac{2\pi R_K n - S_D}{2\pi R_K n} \quad (4)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт ковзання, відн. од.;

$V_D$  – дійсна швидкість, м/с;

$\omega$  – кутова швидкість обертання привідного колеса, рад./с;

$R_K$  – радіус кочення привідного колеса, м;

$n$  – кількість обертів яке робить колесо за одиницю часу, об/с;

$S_D$  – дійсний шлях, який проходить колесо за визначене число обертів колеса, м.

Як показує практика деформоване колесо за один оберт проходить шлях менший ніж колесо без деформацій. Це свідчить про зменшення дійсного радіусу обертання колеса у випадку деформування. Визначення дійсного радіуса обертання деформованого колеса здійснювалося виходячи із припущення існування ковзання деформованого колеса відносно вільного недеформованого стану.

Математично ковзання можна визначити як різницю між довжиною дуги, яку обмежує центральний кут, що спирається на хорду прогину шини колеса та самою довжиною хорди прогину шини колеса, наступним чином (рис. 1):

$$\delta_G = \frac{2\pi}{\alpha} \left( \frac{\alpha R - 2R \sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha R} \right) = \left( 1 - \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha}{2} \right) \quad (5)$$

де  $\delta_G$  – ковзання колеса, відн. од.;

$R$  – початковий радіус кочення колеса, м;

$\alpha$  – центральний кут, який обмежує хорду прогину шини колеса, рад.

Враховуючи, що

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{L}{2R} \quad (6)$$

де  $L$  – довжина хорди, яку утворює прогин шини колеса, м, отримаємо:

$$\delta_G = \left( 1 - \frac{2}{\alpha} \frac{L}{2R} \right) = \left( 1 - \frac{L}{\alpha R} \right) = \left( 1 - \frac{R_D}{R} \right) \quad (7)$$

де  $R_D$  – дійсний радіус кочення деформованого колеса, м.

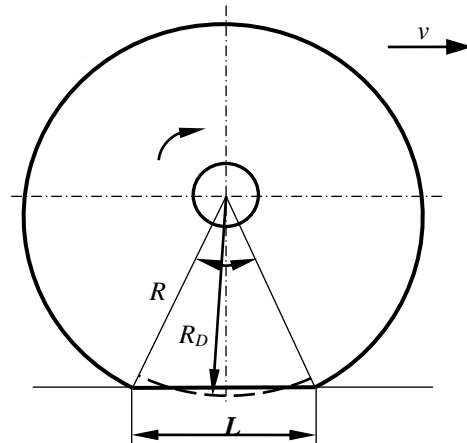


Рис. 1. Спрощена геометрична інтерпретація процесу деформації шини колеса.

Fig. 1. A simplified geometric interpretation of the process of deformation of the tire wheel.

Отже розрахувати дійсний радіус деформованого колеса можна за наступним виразом:

$$R_D = \frac{L}{\alpha} = \frac{L}{2 \arcsin \frac{L}{2R}} \quad (8)$$

Довжина хорди при контакті колеса із опорною поверхнею може бути легко визначена за допомогою експериментальних вимірювань. Складніше визначити початковий радіус колеса, адже форму та деформацію колеса задають конструктивні особливості виконання колеса та протектора.

Оскільки початковий дійсний радіуса кочення задає прикладене вертикальне навантаження, то за початковий радіус слід приймати стан колеса коли деформація протектора викликана власною вагою колеса.

Розглядаючи колесо у вільному стані помітно, що радіус поперечного перерізу величина непостійна. Радіус колеса у вільному стані зменшується від центру протектору до зовнішнього краю. При навантаженні колеса власною вагою відбувається деформація протектора в зоні контакту з опорною поверхнею. Характер деформації протектора задає жорсткість каркасу пневматичної шини та внутрішній тиск в шині.

Визначити зміну радіуса колеса викликану навантаженням власною вагою можна наступним чином:

$$\Delta r = \frac{(l_C - l_K) k_{DP}}{2\pi} \quad (9)$$

де  $\Delta r$  – зменшення радіуса колеса відносно центру протектора та його краю у поперечному перерізі, м;

$l_C$  – довжина колеса по середині протектора, м;

$l_K$  – довжина колеса по краю протектора, м;

$k_{DP}$  – коефіцієнт жорсткості шини, що задає деформацію шини в повздовжньому та поперечному напрямі, відн. од.

Враховуючи вираз (9) початковий радіус колеса визначається наступним чином:

$$R = R_C - \Delta r = \frac{l_C}{2\pi} - \frac{(l_C - l_K)k_{DP}}{2\pi} = \frac{l_C(1 - k_{DP}) + l_K k_{DP}}{2\pi} \quad (10)$$

де  $R_C$  – радіус середини протектора колеса у вільного стані, м.

Враховуючи це, вираз для визначення дійсного радіусу деформованого колеса набуває вигляду:

$$R_D = \frac{L}{2 \arcsin \frac{L\pi}{l_C(1 - k_{DP}) + l_K k_{DP}}} \quad (11)$$

Для визначення дійсного радіусу кочення виконано експериментальні вимірювання необхідних параметрів переднього та заднього колеса. Отримано зміну довжин протектора у вільному стані колеса при зміні тиску. При прийнятих значеннях коефіцієнтів жорсткості шини виконано розрахунок початкового радіусу колеса при відповідному тиску в колесі. Виконано також розрахунок дійсного радіусу кочення та відповідного коефіцієнту ковзання колеса. Експериментальні та теоретичні параметри при зміні тиску переднього колеса занесені в табл. 1, заднього – в табл. 2.

**Таблиця 1.** Експериментальні та теоретичні параметри переднього колеса.

**Table 1.** Experimental and theoretical parameters of the front wheel.

Назва та одиниці вимірювання	Позначення	Тиск в колесі, атм					
		1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
Довжина по середині протектора, м	$l_C$	3,875	3,88	3,88	3,885	3,885	3,89
Довжина по краю протектора, м	$l_K$	3,75	3,747	3,748	3,755	3,755	3,753
Коефіцієнт жорсткості, від. од.	$k_{DP}$	0,92	0,91	0,9	0,89	0,865	0,845
Початковий радіус, м	$R$	0,5984	0,5982	0,5986	0,5999	0,6004	0,6006
Довжина хорди зони контакту, м	$L$	0,383	0,349	0,33	0,32	0,314	0,309
Розрахунковий дійсний радіус кочення, м	$R_D$	0,5879	0,5896	0,5909	0,5926	0,5934	0,5939
Експериментальний дійсний радіус кочення, м	$R_{DS}$	0,588	0,59	0,591	0,593	0,593	0,594

**Таблиця 2.** Експериментальні та теоретичні параметри заднього колеса.

**Table 2.** Experimental and theoretical parameters of the rear wheels.

Назва та одиниці вимірювання	Позначення	Тиск в колесі, атм										
		0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6
Довжина по середині протектора, м	$l_C$	5,483	5,484	5,485	5,485	5,495	5,495	5,5	5,505	5,51	5,51	5,51
Довжина по краю протектора, м	$l_K$	5,253	5,253	5,253	5,253	5,254	5,254	5,255	5,254	5,255	5,26	5,26
Коефіцієнт жорсткості, від. од.	$k_{DP}$	0,615	0,6	0,595	0,545	0,495	0,45	0,42	0,37	0,365	0,36	0,355
Початковий радіус, м	$R$	0,85	0,85	0,851	0,852	0,855	0,857	0,858	0,861	0,862	0,862	0,862
Довжина хорди зони контакту, м	$L$	0,57	0,5	0,46	0,45	0,444	0,435	0,42	0,403	0,395	0,391	0,384
Розрахунковий дійсний радіус кочення, м	$R_D$	0,833	0,838	0,840	0,842	0,845	0,847	0,850	0,853	0,854	0,855	0,855
Дійсний радіус кочення, м	$R_{DS}$	0,833	0,837	0,839	0,842	0,845	0,847	0,849	0,853	0,854	0,854	0,855

Початковий радіус колеса в залежності від тиску повітря шині, розрахований за виразом (10), приведений на рис. 2. Із графіка видно, що початковий радіус колеса збільшується при збільшенні тиску повітря в шині.

На рис. 3 та рис. 4 наведені результати розрахунку та експериментального вимірювання зміни дійсного радіусу кочення відповідно переднього та заднього колеса від зміни тиску повітря в шині. Розрахунковий дійсний радіус кочення визначений на основі значень довжини хорди зони контакту колеса і початкового радіуса колеса згідно виразу (81) для відповідного тиску шини в колесі.

В результаті проведених досліджень обґрунтовано принципи визначення початкового радіуса колеса на базі якого можна здійснити

визначення дійсного радіуса кочення колеса. Високий рівень співпадіння розрахункових та експериментальних значень дійсних радіусів колеса свідчить про адекватність розроблених методів та залежностей для практичного застосування.

Отримані результати дають змогу оцінити вплив деформації колеса під дією вертикального навантаження (ваги енергозасобу) на дійсний радіус кочення колеса та коефіцієнт ковзання. Оскільки вертикальне навантаження величина постійна, то дійсний радіус кочення при перекочуванні колеса можна приймати за початковий стан колеса. Подальші дослідження доцільно продовжувати у напрямку визначення впливу крутного моменту на зміну показників кочення та ковзання колеса. Також важливим питанням для подальшого дослідження є

визначення природи коефіцієнта жорсткості конструктивних параметрів шини колеса на протектора пневматичної шини та визначення впливу деформацію протектора та каркасу колеса.

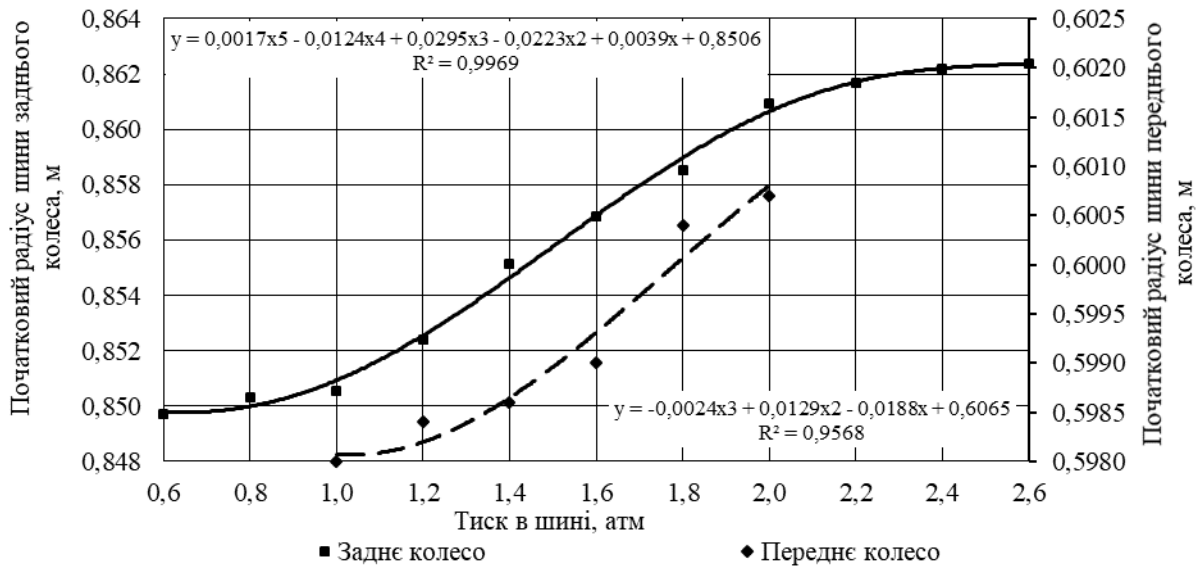


Рис. 2. Залежність початкового радіуса колеса із врахуванням деформації протектора від власної ваги.

Fig. 2. The dependence of the initial radius of the wheel taking into account the deformation of the protector from its own weight.

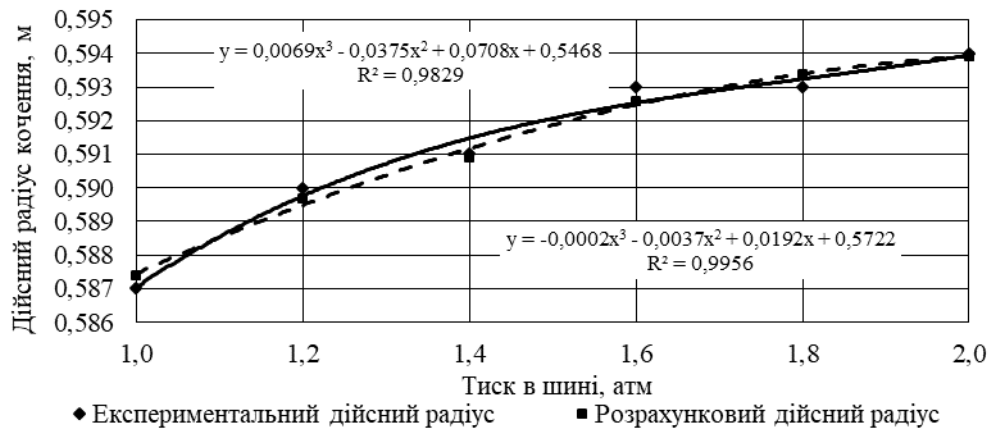


Рис. 3. Залежності розрахункового та експериментального дійсних радіусів кочення переднього колеса від зміни тиску повітря в шині.

Fig. 3. Based on the calculated and experimental actual rolling radii of the front wheel from changes in air pressure in the tire.

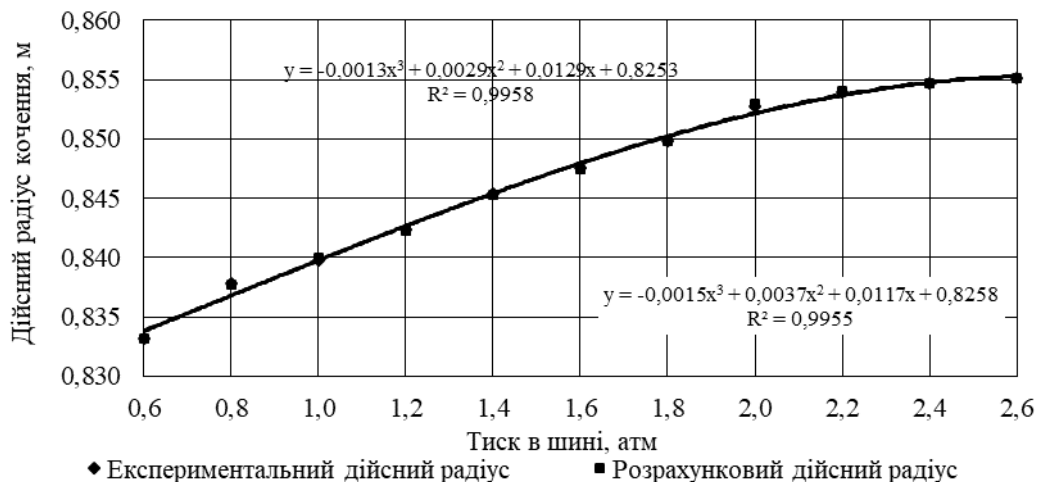


Рис. 4. Залежності розрахункового та експериментального дійсних радіусів кочення заднього колеса від зміни тиску повітря в шині.

Fig. 4. Based on calculated and experimental actual rolling radii of rear wheels from changing air pressure in tire.

### Висновки

1. Визначення початкового радіусу колеса дозволяє виконати розрахунок дійсного радіусу кочення колеса з урахуванням геометричних показників деформації колеса в зоні контакту з опорною поверхнею.

2. На основі геометричних показників зони контакту при взаємодії колеса з опорною поверхнею, отримано вираз для визначення дійсного радіусу кочення колеса. Порівняння розрахункового та експериментально отриманого дійсного радіусу кочення колеса дозволяє стверджувати про адекватність застосованої методики та отриманої залежності для визначення дійсного радіусу кочення. Індекс детермінації розрахункових та експериментальних даних становить  $\eta^2 = 0,98$  для передніх та  $\eta^2 = 0,99$  для задніх коліс.

3. Виконані дослідження підтвердили збільшення дійсного радіусу кочення при збільшенні тиску повітря в шині. Так, для заднього колеса при збільшенні тиску від 0,6 до 2,6 атм спостерігається збільшення радіусу кочення на 21 мм, для переднього колеса при зміні тиску від 1 до 2 атм спостерігається збільшення радіусу кочення на 7 мм. Отримані результати дають змогу виконати оцінку ковзання приводних коліс енергозасобів відповідно до тиску повітря в шинах та параметрів взаємодії з опорною поверхнею.

### Список літератури

1. *Bekker M. G.* Theory of land locomotion. The mechanics of vehicle mobility. Ann Arbor: The Univ. Michigan Press. 1956. 522 p.
2. *J.P. Gray, V.V. Vantsevich, J. Paldan* Agile tire slippage dynamics for radical enhancement of vehicle mobility. Journal of Terramechanics. 2016. Vol. 65. P. 14-37. (doi:10.1016/j.jterra.2016.01.002).
3. *S. Upadhyaya, W Chancellor, D. Wulfsohn* Sources of variability in traction data. Journal of terramechanics. 1988. Vol. 25. P. 249-272.
4. *Kiss P.* Rolling Radii of a Pneumatic Tyre on Deformable Soil. Biosystems Engineering. 2003. Vol. 85. P. 153-161.
5. *H.A. Hamersma, T.R. Botha, Els. P. Schalk.* The dynamic rolling radius of a pneumatic tyre on hard terrains. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing. 2016. Vol 11, Issue 3. P. 234-251. (doi:10.1504/ijvsmt.2016.080879).
6. *Jazar R. N.* Vehicle dynamics: Theory and application. Springer. New York. 2017. 985 p. (doi.org/10.1007/978-3-319-53441-1).
7. *Pauwelussen J.P., Dalhuijsen W., Merts M.* Tyre dynamics, tyre as a vehicle component. Virtual Education in Rubber Technology (VERT). HAN University. 2007. [http://laroverket.com/wp-content/uploads/2015/03/tyre\\_as\\_car\\_component.pdf](http://laroverket.com/wp-content/uploads/2015/03/tyre_as_car_component.pdf) (дата звернення: 06.11.2018).
8. *T. Wilson, M. Siero, C. Kopchick, V. Vantsevich* Terrain Truck: Control of Wheel Rotational Velocities

and Tire Slippages. SAE Technical Paper 2011-01-2157. 2011. (doi:10.4271/2011-01-2157).

9. *J. Ryan, D. Bevly* Tire radius determination and pressure loss detection using GPS and vehicle stability control sensors. IFAC Proceedings. 2012. Vol 8., Issue 1. P. 1203-1208. (doi:10.3182/20120829-3-mx-2028.00090)

10. *N.K. M'Sirdi, A. Rabhi, L. Fridman, J. Davila, Y. Delanne* Second order sliding-mode observer for estimation of vehicle dynamic parameters. Vehicle Design. 2008. Vol. 48. P. 190-207.

11. *C. El. Tannoury, C. Plestan, F. Moussaoui, N. Romani* Tyre effective radius and vehicle velocity estimation: A variable structure observer solution. International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices 2011. P. 1-6. (doi:10.1109/ssd.2011.5767491).

### References

1. *M.G. Bekker.* (1956). Theory of land locomotion. The mechanics of vehicle mobility. Ann Arbor: The Univ. Michigan Press. 522.
2. *J.P. Gray, V.V. Vantsevich, J. Paldan.* (2016). Agile tire slippage dynamics for radical enhancement of vehicle mobility. Journal of Terramechanics, Vol. 65, 14-37.
3. *S. Upadhyaya, W Chancellor, D. Wulfsohn* (1998). Sources of variability in traction data. Journal of terramechanics, Vol. 25, 249-272.
4. *P. Kiss.* (2003). Rolling Radii of a Pneumatic Tyre on Deformable Soil. Biosystems Engineering, Vol. 85, 153-161.
5. *H.A. Hamersma, T.R. Botha, Els. P. Schalk* (2016). The dynamic rolling radius of a pneumatic tyre on hard terrains. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, Vol 11 (3), 234-251.
6. *R. N. Jazar.* (2017). Vehicle dynamics: Theory and application. Springer. New York, 985.
7. *Pauwelussen J.P., Dalhuijsen W., Merts M.* (2007). Tyre dynamics, tyre as a vehicle component. Virtual Education in Rubber Technology (VERT). HAN University.
8. *T. Wilson, M. Siero, C. Kopchick, V. Vantsevich.* (2011). Rotational Velocities and Tire Slippages. SAE Technical Paper 2011-01-2157.
9. *J. Ryan, D. Bevly.* (2012). Tire radius determination and pressure loss detection using GPS and vehicle stability control sensors. IFAC Proceedings, Vol 8 (1), 1203-1208.
10. *N.K. M'Sirdi, A. Rabhi, L. Fridman, J. Davila, Y. Delanne.* (2008). Second order sliding-mode observer for estimation of vehicle dynamic parameters, Vol. 48, 190-207.
11. *C. El. Tannoury, C. Plestan, F. Moussaoui, N. Romani.* (2011). Tyre effective radius and vehicle velocity estimation: A variable structure observer solution. International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 1-6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО РАДИУСА  
КАЧЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КОЛЕС*Г. А. Голуб, В. В. Чуба*

**Аннотация.** Полученные результаты позволяют вычислить фактический радиус качения колеса приводных колес самоходных машин, в соответствии с давлением воздуха в шинах и параметрами взаимодействия с опорной поверхностью.

На основании разработанной модели для определения начального радиуса колеса и длиной зоны контакта колеса с опорной поверхностью, была получена зависимость для определения фактического радиуса качения колеса.

Исследования подтвердили увеличение фактического радиуса качения и уменьшение увеличения давления воздуха в шинах. Например, для заднего колеса трактора John Deere 7130 с увеличением давления от 0,6 до 2,6 атм наблюдалось увеличение радиуса качения на 21 мм. Для переднего колеса, когда давление изменилось от 1 до 2 атм, радиус качения увеличился на 7 мм. Индекс определения расчетных и экспериментальных значений реального радиуса качения составляет  $\eta^2 = 0,98$  для переднего колеса и  $\eta^2 = 0,99$  для задние колеса, что свидетельствует об адекватности рассчитанных зависимостей.

**Ключевые слова:** радиус качения колеса, деформация колеса, давление воздуха в шине, зона контакта колеса с опорной поверхностью

DETERMINATION OF ROLLING RADIUS OF  
PNEUMATIC WHEELS*G. A. Golub, V. V. Chuba*

**Abstract.** The obtained results allow calculating the actual rolling radius of the wheel of the drive wheels of self-propelled machines in accordance with the air pressure in the tires and the parameters of interaction with the support surface.

On the basis of the developed model for determining the initial radius of the wheel and the length of the contact zone of the wheel with the support surface, the dependence for determining the actual radius of the wheel rolling was obtained.

The studies have confirmed an increase in the actual rolling radius and a decrease an increase in air pressure in the tires. For example, for the rear wheel of a tractor John Deere 7130 with an increase in pressure from 0.6 to 2.6 atm, an increase in the rolling radius by 21 mm were observed. For the front wheel, when the pressure changed from 1 to 2 atm, the rolling radius increased by 7 mm The index of determination of calculated and experimental values of the real rolling radius is  $\eta^2 = 0,98$  for the front and  $\eta^2 = 0.99$  for the rear wheels, which indicates the adequacy of the calculated dependences.

**Key words:** rolling wheel radius, wheel deformation, air pressure in the tire, wheel contact area with bearing surface.

Г. А. Голуб ORCID 0000-0002-2388-0405.

В. В. Чуба ORCID 0000-0002-4119-0520.

