

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЧЕННЯ КОЛЕСА З ПІДВИЩЕНОЮ ШВИДКІСТЮ ПО ПУХКОМУ ҐРУНТІ

Калінін Є., докт. техн. наук, доц.,
e-mail: kalininhntusg@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-6191-8446>;
Харківський національний технічний університет сільського
господарства імені Петра Василенка,
Балабай Т.,
e-mail: hfuksndipvt@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-0452-1407>
Харківська філія ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»

Анотація

Мета дослідження – формалізація залежності між швидкістю кочення колеса, його параметрами і глибиною утвореної колії, а також визначення потрібного тягового зусилля для кочення веденого колеса з жорстким ободом по пухкому ґрунті.

Методи дослідження передбачають використання основ синтезу аналітичних залежностей між кінематичними показниками колеса, яке рухається по пухкому ґрунті, та фізико-механічними характеристиками ґрунту.

Результати дослідження. Аналіз матеріалів попередніх дослідників показує, що закономірності процесу кочення колеса по пухкому ґрунті з утворенням колії можуть бути розкриті більш повно і в загальному вигляді, якщо прийняти дві основні передумови. Перша передумова передбачає, що залежність між нормальним тиском на елементарній площі обода колеса і глибиною його занурення в ґрунт змінюється за логарифмічним законом. Друга передумова говорить про те, що зусилля на перекочування колеса витрачається на деформацію ґрунту під час утворення колії під колесом, на надання кінетичної енергії об'єму ґрунту, який витискається з колії та на подолання тертя колеса об стінку колії і на силу зчеплення ґрунту з ободом колеса. Використовуючи ці дві передумови, визначено глибину колії під час кочення колеса. Встановлено, що глибина колії обернено пропорційна кубу швидкості і квадрату діаметра колеса.

Баланс тягового зусилля на перекочування веденого колеса складається з двох складових. Перша складова тягового зусилля витрачається на деформацію ґрунту й утворення колії. Оскільки зі збільшенням швидкості кочення глибина колії зменшується, очевидно, ця частина тягового зусилля теж повинна зменшуватися. Друга складова витрачається на надання кінетичної енергії масі ґрунту, який витісняється з борозни. Зі збільшенням швидкості кочення ця частина тягового зусилля буде збільшуватися.

Висновки. У ході моделювання взаємодії колеса, яке рухається з великою швидкістю, по пухкому ґрунті, отримана залежність, яка зручна для практичних розрахунків, оскільки враховує властивості ґрунту, розмір колеса і режим кочення. Встановлено, що тяговий опір перекочування зі збільшенням швидкості кочення буде зменшуватися, якщо навантаження на колесо не перевищує цілком певної величини, яка є критичною для конкретних умов.

Ключові слова: кочення колеса, пухкий ґрунт, тяговий опір, утворення колії, тяговий баланс.

Постановка проблеми. У сільськогосподарських машинах, наприклад, у просапних культиваторах, бурякових, овочевих і кукурудзяних сівалках та інших машинах, глибина ходу робочих органів регулюється, переважно, опорними колесами. Через підвищення робочих швидкостей агрегатів було помічено, що зі збільшенням швидкості руху глибина ходу сошників або культиваторних лап зменшується. Це явище аналогічне руху автомобіля на великій швидкості, який може проїхати по пухкому піску, не залишаючи глибокої колії. На малій же швидкості утворюється глибока колія, і машина взагалі не може рухатися або рухається з ускладненням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що процес кочення колеса по пластичному, пухкому ґрунті досить складний, тому що за цих умов відбувається зминання ґрунту й утворення колії, перед колесом з'являється наваловування, кочення супроводжується взаємним зсувом окремих шарів під колесом [1]–[3]. Всі ці фактори, разом з фізико-механічними властивостями ґрунтів, слабо піддаються обліку й ускладнюють розрахунок зусилля на перекочування і глибину колії [4]–[6].

Різні автори, виходячи з тих чи інших передумов, дають різні формули для визначення зусилля перекочування, причому результати залежать по суті від довільного вибору коефіцієнта, який входить у формулу, що визначається емпірично або дослідним шляхом [7]. Саме тому, формування узагальненої теорії руху колеса по ґрунті, який деформується, є актуальним науковим завданням.

Мета і постановка задач дослідження. Метою дослідження є формалізація залежності між швидкістю кочення колеса, його параметрами і глибиною утворюваної колії, а також визначення потрібного тягового зусилля для кочення веденого колеса з жорстким ободом по пухкому ґрунті.

Виклад основного матеріалу. Аналіз матеріалів попередніх дослідників показує, що закономірності процесу кочення

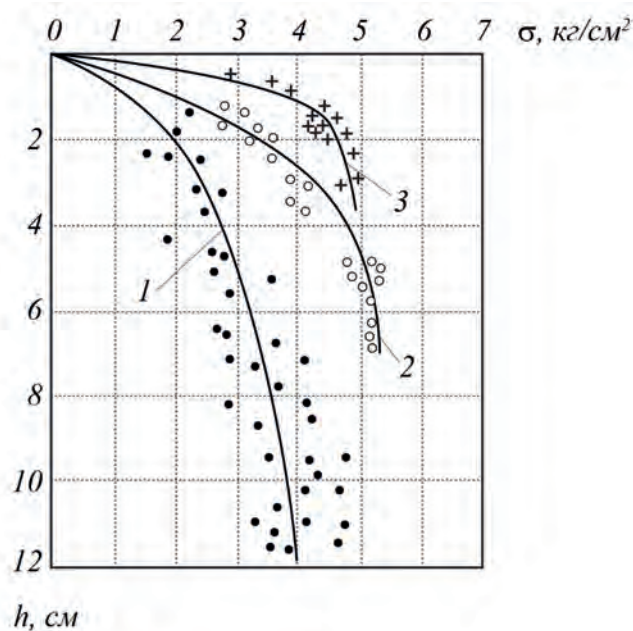
колеса по пухкому ґрунті з утворенням колії можуть бути розкриті більш повно і в загальному вигляді, якщо прийняти дві основні передумови [1]–[3].

Перша передумова передбачає, що залежність між нормальним тиском на елементарній площі обода колеса і глибиною його занурення в ґрунт змінюється за логарифмічним законом:

$$q = q_0 \ln(eh), \quad (1)$$

де q – нормальний тиск на ободі колеса; q_0 – питомий опір ґрунту, який відповідає зануренню на один сантиметр; e – основа натурального логарифму; h – глибина занурення.

На рисунку 1 наведені дослідні дані залежності питомого нормального тиску на ободі колеса від занурення в ґрунт. Як видно, теоретичні криві за прийнятою нами залежністю збігаються з дослідними даними.



- 1 – свіжозораний ґрунт, ретельно розпушений;
- 2 – такий же ґрунт, улежаний і ущільнений дощами;
- 3 – пухкий, ущільнений легким котком, ґрунт

Рисунок 1 – Залежність між питомим нормальним тиском на ободі колеса і глибиною занурення в ґрунт цієї площі

Питомий опір ґрунту q_0 характеризує його транспортувальну здатність і має ту

ж розмірність, що і питомий нормальний тиск σ .

Друга передумова говорить про те, що зусилля на перекочування колеса витрачається:

а) на деформацію ґрунту під час утворення колії під колесом, — мало залежить від швидкості кочення;

б) на надання кінетичної енергії об'єму ґрунту, який витискається з колії, — залежить від швидкості кочення;

в) на подолання тертя колеса об стінку колії і на силу зчеплення ґрунту з ободом колеса.

Як показують результати багатьох експериментів [1]–[3], остання складова чисельно дуже мала порівняно з першими двома.

Використовуючи ці дві передумови, визначимо глибину колії під час кочення колеса з дуже малою швидкістю.

Вертикальна складова сили опору ґрунту змінанню врівноважується тиском на колесо, тобто:

$$Q = \int dN \cos \alpha = \int qB \Delta S \cos \alpha, \quad (2)$$

де dN — елементарна вертикальна складова сили опору ґрунту; α — кут охоплення колеса ґрунтом; B — ширина колеса; ΔS — колова довжина елементарної ділянки шини.

З рисунку 2 випливає:

$$\Delta S \cos \alpha = dx, \quad (3)$$

де dx — зміна повздовжньої координати розташування елементарної ділянки.

Тому

$$Q = \int_0^x qB dx. \quad (4)$$

Встановлюючи зв'язок між x і h (рис. 2) і знаючи, що величина q визначається із залежності (1), отримаємо:

$$Q = \frac{2}{3} q_0 B \ln(eh) \sqrt{Dh_0}. \quad (5)$$

де h_0 — глибина колії на швидкості кочення, близькій до нульової.

Ця формула встановлює залежність між розмірами колеса, навантаженням на

нього, властивостями ґрунту і глибиною колії. Вигляд цієї формули подібний до формули, даної Летошневим, з тією лише істотною різницею, що питомий опір ґрунту q_0 має іншу розмірність і закон зміни його за глибиною відповідає логарифмічній кривій.

Це відповідає дослідним даним ширших діапазонів зміни параметрів колеса, режиму кочення і властивостей пухкого ґрунту.

Користуючись формулою (5), можна визначити глибину колії під час кочення колеса з малою швидкістю, наприклад, до 0,5 м/с.

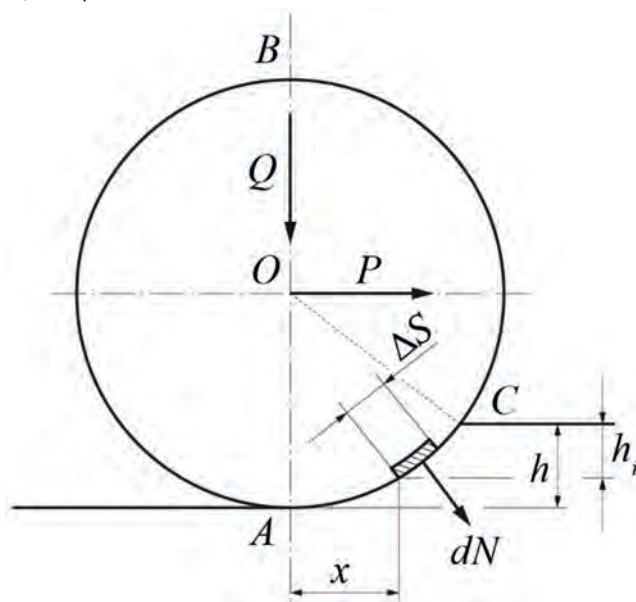


Рисунок 2 – Схема взаємодії колеса, яке рухається з малою швидкістю, з пухким ґрунтом

Спробуємо визначити глибину колії з урахуванням швидкості кочення. Під час кочення колеса зі швидкістю v витісняється об'єм ґрунту з колії, при цьому витіснення йде в напрямку кочення (рис. 3).

Кінетична енергія T , яка надається масі ґрунту m , витісненої з колії, буде дорівнювати:

$$T = \frac{mv^2}{2}, \quad (6)$$

де v — швидкість руху маси ґрунту.

Відомо, що зі збільшенням швидкості кочення глибина колії зменшується на деяку величину

$$\Delta h = h_0 - h, \quad (7)$$

де h – глибина колії на швидкості кочення, більший за нульову.

Зі зменшенням глибини колії колесо, піднімаючись на величину Δh , здійснює роботу:

$$A = Q\Delta h = Q(h_0 - h). \quad (8)$$

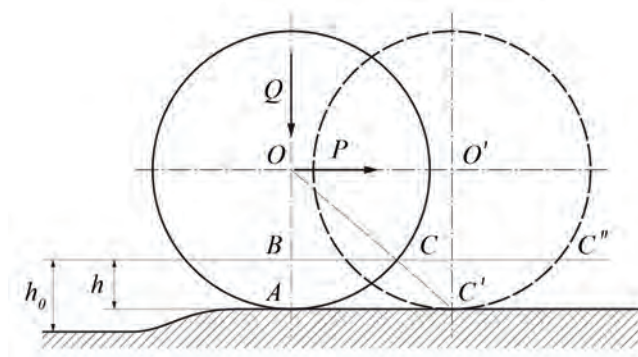


Рисунок 3 – До визначення глибини колії під час кочення колеса з малою швидкістю

Тому частина тягового зусилля витрачається на підйом колеса на величину Δh . Зі свого боку, цей рівень підйому визначається величиною кінетичної енергії, яка надається масі ґрунту, витиснутій з колії. За цих умов має бути рівність зміни кінетичної енергії і здійснюваної роботи, тобто:

$$\frac{mv^2}{2} = Q(h_0 - h). \quad (9)$$

На рис. 3 видно, що під час кочення колеса точка C на ободі проходить шлях, який дорівнює величині глибини колії h , коли переходить у положення C' , при цьому колесо, котячись зі швидкістю v , проходить шлях OO' . Очевидно маса витісненого ґрунту буде дорівнювати:

$$m = \frac{BhS\gamma}{q}, \quad (10)$$

де B – ширина обода; γ – об'ємна вага ґрунту.

З рис. 3 випливає, що

$$S = OO' = \cup AC = AC'.$$

Довжина дуги дорівнює:

$$\cup AC = \frac{1}{2} \sqrt{(2BC)^2 + \frac{16}{3} h^2}. \quad (11)$$

З $\triangle BOC$ знаходимо, що

$$BC = \sqrt{Dh - h^2}. \quad (12)$$

Підставляючи це значення в (11), знайдемо:

$$S = \cup AC' = \sqrt{Dh + \frac{1}{3} h^2}, \quad (13)$$

або для практичних потреб з помилкою не більше 3 %:

$$S = \sqrt{Dh}. \quad (14)$$

Підставляючи значення з (14) і (10) в формулу (9), отримаємо:

$$\frac{Bh\gamma\sqrt{Dh}v^2}{2g} = Q(h_0 - h). \quad (15)$$

Звідки:

$$v^2 = \frac{2gQ}{B\sqrt{D}\gamma} \cdot \frac{h_0 - h}{\sqrt{h^3}}. \quad (16)$$

Користуючись цією формулою і формулою (5), можна побудувати графіки залежності глибини колії від швидкості за вибраних параметрів колеса і навантаження на нього. З цієї формули випливає, що глибина колії обернено пропорційна кубу швидкості і квадрату діаметра колеса.

Баланс тягового зусилля на перекочування веденого колеса, очевидно, складається з двох складових.

Перша складова тягового зусилля витрачається на деформацію ґрунту і утворення колії. Оскільки зі збільшенням швидкості кочення глибина колії зменшується, очевидно, ця частина тягового зусилля теж повинна зменшуватися.

Друга складова витрачається на надання кінетичної енергії масі ґрунту, витісненій з борозни. Зі збільшенням швидкості кочення ця частина тягового зусилля буде збільшуватися.

Через це заздалегідь важко визначити характер зміни величини загального тягового зусилля перекочування колеса. У загальному вигляді зусилля перекочування дорівнюватиме:

$$P = P_1 + P_2, \quad (17)$$

де P_1 – зусилля, яке витрачається на деформацію ґрунту на досить малій швидкості; P_2 – зусилля, яке витрачається на надання кінетичної енергії об'єму витісненого ґрунту.

Визначимо величину складових P_1 і P_2 .

Прирівнюючи роботу сили P_1 на шляху S роботі зминання ґрунту під площею $B\Delta S$ на глибину h , для всієї частини колеса, зануреної в ґрунт, матимемо (рис. 2):

$$P_1 \Delta S = \int_0^n q B \Delta S dh,$$

(не може P_1 , оскільки P_1 – для всіх ділянок, а у нас n ділянок, тому і по них проводиться інтегрування),

(18)

де n – кількість елементарних ділянок, на які розбита дуга колеса, занурена в ґрунт.

Підставляючи значення величин та інтегруючи, отримаємо:

$$P_1 = Bhq_0 \ln(eh). \quad (19)$$

Друга складова зусилля, яка витрачається на збільшення швидкості кочення, визначиться з умови, що робота сили на шляху ΔS буде дорівнювати за величиною кінетичній енергії, яка надається витісненому з колії об'єму ґрунту:

$$P_2 \sqrt{Dh} = \frac{Bh\gamma \sqrt{Dh} v^2}{2g}, \quad (20)$$

або

$$P_2 = \frac{Bh\gamma v^2}{2g}. \quad (21)$$

Загальне тягове зусилля дорівнюватиме:

$$P = Bhq_0 \ln(eh) + \frac{Bh\gamma v^2}{2g}. \quad (22)$$

Щоб визначити характер зміни величини загального тягового опору перекочування колеса, представимо вираз (17) в такому вигляді:

$$P = P_1 - P_\Delta + P_2, \quad (23)$$

де P_Δ – зниження тягового опору на деформацію ґрунту в результаті зменшен-

ня глибини колії.

Аналізуючи вираз (23), можна зробити висновок, що якщо другий і третій члени рівні між собою, тобто $P_\Delta = P_2$ то загальний тяговий опір зі збільшенням швидкості кочення не зміниться.

У тому випадку якщо $P_\Delta > P_2$, загальний тяговий опір зменшується і навпаки.

Підставляючи значення величин і перетворюючи, отримаємо:

$$Q \leq B\sqrt{Dh}q_0 \ln\left(e \frac{h_0 + h}{2}\right). \quad (24)$$

Висновки. У ході моделювання взаємодії колеса, яке рухається з великою швидкістю, по пухкому ґрунті, отримана залежність (24), яка зручна для практичних розрахунків, оскільки враховує властивості ґрунту, розмір колеса і режим кочення. Як видно з (24), тяговий опір перекочування зі збільшенням швидкості кочення буде зменшуватися.

Література

1. Кутков Г.М. Тяговая динамика тракторов. – М. : Машиностроение, 1980. – 216 с.
2. Барский И.Б., Анилович В.Я., Кутков Г.М. Динамика трактора. – М. : Машиностроение, 1973. – 280 с.
3. Золотаревская Д.И. Особенности качения колес по вязкоупругой почве. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. №8. С. 15 – 19.
4. Лебедев А.Т., Калінін Є.І. Теоретичне дослідження тягово-зчіпних властивостей тракторів, обладнаних здвоєними шинами, під час виконання ґрунтообробних робіт на агрофоні підвищеної вологості. Зб. наук. праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Дослідницьке. 2010. №. 14(28). С. 216-224.
5. Калінін Є.І., Шуляк М.Л., Мальцев В.П. Вплив нестационарності тягового навантаження на буксування рушіїв колісного трактора. Системи обробки інфор-

мації. 2017. №5. С. 27-30

6. Лебедєв А.Т., Калінін Є.І. Динамічна модель ґрунтообробних машинно-тракторних агрегатів з пасивними робочими органами у складі енергетичного засобу зі здвоєними шинами. Системи обробки інформації. 2010. № 2. С. 109-115

7. Іванов В.І., Калінін Є.І. Підвищення надійності системи методом селекції її елементів. Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. 2015. Вип. 163. С.142-146.

Literature

1. Kutkov G.M. Traction dynamics of tractors. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – 216 p.

2. Barsky I.B., Anilovich V.Ya., Kutkov G.M. The dynamics of the tractor. – M.: Mechanical Engineering, 1973. – 280 p.

3. Zolotarevskaya D.I. Features of rolling wheels on viscoelastic soil. Tractors and agricultural machinery. 2005. 8. 15-19.

4. Lebedev A.T., Kalinin E.I. Theoretically, the driving power of tractors possessing healthy tires, the hour of a weekend of working robots on agricultural landlines. Zb. nauk. prats UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. Tekhniko-tehnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuвання novoi tekhniky i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy. Doslidnytske. 2010. 14(28). 216-224.

5. Kalinin E.I., Shulyak M.L., Maltsev V.P. The infusion of unsteadiness of the hook navigation on the towing of a tractor. Information Processing Systems. 2017. 5. 27-30

6. Lebedev A.T., Kalinin E.I. A dynamic model of the front-sided machine-tractor units with lively working bodies at the warehouse of energetic troubles with healthy tires. Information Processing Systems. 2010. 2. 109-115.

7. Ivanov V.I., Kalinin E.I. Improving the reliability of the system by the method of selection of its elements. Problems of reliability of machines and means of mechanization of agricultural production:

Bulletin of Petro Vasylenko KhNTUSG. 2015. Vol.163. 142-146

Literatura

1. Kutkov G.M. Tyagovaya dinamika traktorov. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 216 s.

2. Barskij I.B., Anilovich V.Ya., Kutkov G.M. Dinamika traktora. – M.: Mashinostroenie, 1973. – 280 s.

3. Zolotarevskaya D.I. Osobennosti kacheniya koles po vyazkouprugoj pochve. Traktory i selskohozyajstvennye mashiny. 2005. №8. S. 15-19.

4. Lebedyev A.T., Kalinin E.I. Teoretichne doslidzhennya tyagovo-zchipnih vlastivostej traktoriv, obladnanih zdvojenimi shinami, pid chas vikonnannya gruntoobrobnih robit na agrofoni pidvishenoyi vologosti. Zb. nauk. prats UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. Tekhniko-tehnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuвання novoi tekhniky i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy. Doslidnytske. 2010. №. 14(28). S. 216-224.

5. Kalinin E.I., Shulyak M.L., Malcev V.P. Vplyv nestacionarnosti gakovogo navantazhennya na buksuvannya rushiyiv kolisnogo traktora. Sistemi obrobki informaciyi. 2017. №5. S. 27-30

6. Lebedyev A.T., Kalinin E.I. Dinamichna model gruntoobrobnih mashinno-traktornih agregativ z pasivnimi robochimi organami u skladi energetichnogo zasobu zi zdvojenimi shinami. Sistemi obrobki informaciyi. 2010. № 2. S. 109-115

7. Ivanov V.I., Kalinin E.I. Pidvishennya nadijnosti sistemi metodom selekciyi yiyi elementiv. Problemi nadijnosti mashin ta zasobiv mehanizaciyi silskogospodarskogo virobnictva: Visnik HNTUSG imeni Petra Vasilenka. 2015. Vip. 163. S.142-146

UDC 631.372

EXPLORATION OF ROLLING WHEEL WITH INCREASED SPEED ON FLOOR SOIL

Kalinin E., Ph. D, Associate Professor,
e-mail: kalininhntusg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6191-8446>;
Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture,
Balabay T., head of Testing Laboratory,
e-mail: [hfukrndipvt@gmail.com](mailto:hfuksndipvt@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0452-1407>
Kharkiv branch of SSO «L. Pogorilyy UkrNDIPVT»

Summary

Purpose of the study. *The purpose of the study is to formalize the relationship between the rolling speed of the wheel, its parameters and the resulting track depth, as well as determining the required traction for rolling the driven wheel with a hard rim on loose soil.*

Research methods. *Research methods involve the use of the foundations of the synthesis of analytical relationships between the kinematic parameters of a wheel that moves along loose soil and the physical and mechanical characteristics of the latter.*

The results of the study. *An analysis of the materials of previous researchers shows that the patterns of the wheel rolling on loose soil with the formation of a gauge can be revealed more fully and in general terms, if two basic premises are accepted. The first premise assumes that the relationship between the normal pressure on the elementary area of the wheel rim and the depth of its immersion in the soil changes according to a logarithmic law. The second premise suggests that the effort to roll the wheel is spent on deforming the soil when a track is formed under the wheel, on communicating kinetic energy to the volume of soil pushed out of the track and on overcoming friction of the wheel against the track wall and on the force of adhesion of the soil to the wheel rim. Using these two premises, the track depth is determined when the wheel is rolling. It is established that the track depth is inversely proportional to the speed cube and the square of the diameter of the wheel.*

The balance of traction on rolling the driven wheel consists of two components. The first component of traction is spent on soil deformation and rutting. Since the track depth decreases with an increase in the rolling speed, obviously, this part of the pulling force should also decrease. The second component is spent on communicating kinetic energy to the mass of soil, which is displaced from the furrow. With an increase in the rolling speed, this part of the tractive effort will increase.

Conclusions. *In the course of modeling the interaction of a wheel that moves at high speed on loose soil, a dependence is obtained that is convenient for practical calculations, since it takes into account soil properties, wheel size and rolling mode. It was found that the traction resistance to rolling with increasing rolling speed will decrease if the load on the wheel does not exceed a well-defined value, which is critical for these conditions.*

Keywords: *wheel rolling, loose soil, traction resistance, rutting, traction balance*

УДК 631.372

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕНИЯ КОЛЕСА С ПОВЫШЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ПО РЫХЛОЙ ПОЧВЕ

Калинин Е., докт. техн. наук, доц.,

e-mail: kalininhtusg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6191-8446>;

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка,

Балабай Т.,

e-mail: [hfukrndipvt@gmail.com](mailto:hfuksndipvt@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0452-1407>

Харьковский филиал ГНУ «УкрНИИПИТ им. Л.Погорелого»

Аннотация

Цель исследований – формализация зависимости между скоростью качения колеса, его параметрами и образующейся глубиной колеи, а также определение нужного тягового усилия для качения ведомого колеса с жестким ободом по рыхлому грунту.

Методы исследования предполагают использование основ синтеза аналитических зависимостей между кинематическими показателями колеса, которое движется по рыхлой почве, и физико-механическими характеристиками последнего.

Результаты исследований. Анализ материалов предыдущих исследователей показывает, что закономерности процесса качения колеса по рыхлой почве с образованием колеи могут быть раскрыты более полно и в общем виде, если принять две основные предпосылки. Первая предпосылка предполагает, что зависимость между нормальным давлением на элементарной площади обода колеса и глубиной его погружения в почву изменяется по логарифмическому закону. Вторая предпосылка говорит о том, что усилие на перекачивание колеса расходуется на деформацию грунта при образовании колеи под колесом, на сообщение кинетической энергии объему грунта, выталкиваемому из колеи и на преодоление трения колеса о стенку пути и на силу сцепления грунта с ободом колеса. Используя эти две предпосылки, определены глубина колеи при качении колеса. Установлено, что глубина колеи обратно пропорциональна кубу скорости и квадрату диаметра колеса.

Баланс тягового усилия на перекачивание ведомого колеса состоит из двух составляющих. Первая составляющая тягового усилия тратится на деформацию грунта и образование колеи. Поскольку с увеличением скорости качения глубина колеи уменьшается, очевидно, эта часть тягового усилия тоже должна уменьшаться. Вторая составляющая затрачиваемое на сообщение кинетической энергии массе почвы, которая вытесняется из борозды. С увеличением скорости качения эта часть тягового усилия будет увеличиваться.

Выводы. В ходе моделирования взаимодействия колеса, которое движется с большой скоростью, по рыхлой почве, получена зависимость, которая удобна для практических расчетов, поскольку учитывает свойства почвы, размер колеса и режим качения. Установлено, что тяговое сопротивление перекачиванию с увеличением скорости качения будет уменьшаться, если нагрузка на колесо не превышает вполне определенной величины, которая является критической для данных условий.

Ключевые слова: качение колеса, рыхлая почва, тяговое сопротивление, образование колеи, тяговый баланс