УДК 631.37 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.119-127

А. В. Чепіжний, доц., канд. техн. наук, **Т. В. Хворост,** доц., канд. екон. наук
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
С. В. Чугаєв, канд. с.-г. наук
Великоанадольський лісотехнічний фаховий коледж імені Віктора Єгоровича фон Граффа, м. Апостолове, Дніпропетровська область, Україна
В. Є. Коваленко, В. В. Шутко
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
e-mail: andrii.chepizhnyi@snau.edu.ua, tetiana.khvorost@snau.edu.ua, agro.chugayev@gmail.com, kovalenkovladislav660@gmail.com, v.shutko.gs@snau.edu.ua

Аналіз основних показників та математичних моделей взаємодії колеса з агрофоном (ґрунтом)

В статті розглянуто основні аспекти взаємодії колісних рушіїв аграрної техніки з агрофоном. Проведено основний аналіз математичних моделей визначення площі контакту колеса з агрофоном (ґрунтом), з врахуванням аналізу особливостей їх використання при проведенні розрахунків. Враховано переваги простих математичних моделей, що дозволяють проводити швидкі розрахунки в польових умовах, а також наведено математичні моделі, що дозволяють проводити наукові дослідження з врахуванням максимальної кількості параметрів взаємодії. Визначено, що найбільш ефективною математичною моделлю, опису взаємодії колеса з агрофоном (ґрунтом) є моделі, що враховують характеристику колеса та агрофону. При цьому необхідно враховувати деформації шини колеса та ґрунту.

Більшість математичних моделей покладені в основу програмного забезпечення, що дозволяє проводити моделювання різноманітних процесів взаємодії колісного рушія з агрофоном (ґрунтом). Основним платформами на яких реалізовано подібне програмне забезпеченням є платформи типу Tyre / Track-Soil Interaction (TT-SI), ADAMS, SoilContact (MATLAB).

Для загального аналізу проведено побудову спрощеного схематичного зображення епюри тиску колеса аграрної техніки на агрофон (ґрунт). Проведено опис основних зон впливу колеса на агрофон (ґрунт). На основі отриманих даних площі контакту наведено параметри взаємодії колеса з агрофоном, що описуються силою опору перекочування, площею контакту колеса, а також такими показниками як буксування та юз. Наведено основний вплив даних показників на техніко-експлуатаційні показники роботи сучасної аграрної техніки.

колесо, юз, бічне зчеплення, епюра, тиск, ґрунт, агрофон, опір перекочуванню, агрегат, площа контакту, швидкість руху, математична модель, програмне забезпечення

Постановка проблеми. Розвиток сучасної аграрної техніки, різноманіття колісних рушіїв та шин потребує постійних наукових досліджень з точки зору визначення основних їх параметрів. При цьому визначення параметрів взаємодії колісних рушіїв з агрофоном (ґрунтом) повинно ґрунтуватись в першу чергу на визначенні параметрів ущільнення ґрунту та визначенні техніко-експлуатаційних показників використання даної техніки. Дослідження основних параметрів взаємодії колісного рушія з агрофоном має першочергову залежність від площі контакту кожного окремого колеса колісного рушія, типу колеса та інших параметрів сучасної аграрної техніки.

Станом на сьогодні існує доволі велика кількість досліджень та математичних моделей, пов’язаних з визначенням площі контакту. При цьому враховуються різноманітні показники такі, як тиск в шині, деформація шини, деформація агрофону (ґрунту), кількість та форма ґрунтозачепів та інші.

© А. В. Чепіжний, Т. В. Хворост, С. В. Чугаєв, В. Є. Коваленко, В. В. Шутко, 2026

При введенні більшої кількості параметрів для опису взаємодії колеса з агрофоном виникає значне ускладнення проведення розрахунків. Прості математичні моделі легкі в обчисленнях для польових умов та при цьому не враховують великої кількості параметрів взаємодії.

Визначення дійсних значень сили опору перекочування, бічного зчеплення, а також значень буксування та юзу, забезпечує високу достовірність результатів базових обчислень для розрахунку техніко-експлуатаційних показників роботи аграрної техніки та відповідно знаходження найкращих параметрів роботи колісного рушія у реальних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Колісний рушій є найбільш розповсюдженим типом рушія аграрної техніки. При цьому даний тип рушія є не менш складним у конструктивному виконанні, адже він включає до свого складу колеса, що фактично є різними за типом та призначенням. Так у праці [1] запропоновано класифікацію колісних рушіїв аграрної техніки. Відповідно до даної класифікації колеса колісного рушія поділяють на три типи: активне, пасивне та реактивне. Активні колеса відповідно до даної класифікації є привідними колесами аграрної техніки, тобто на них передається крутний момент від двигуна. Пасивні колеса перекочуються під дією сили, яку створюють активні колеса аграрної техніки. Активні та пасивні колеса можуть бути керованими, тобто можуть використовуватись для зміни напрямку руху аграрної техніки.

Відповідно до даної класифікації, основних параметрів та особливостей роботи кожного типу коліс, з яких складається колісний рушій аграрної техніки, отримуємо різні параметри та характеристику взаємодії колеса з агрофоном. Вплив на ущільнення ґрунту та формування колії на агрофоні також різний для даних типів коліс. А отже, математичні моделі для визначення параметрів взаємодії колісного рушія з агрофоном також повинні враховувати дані особливості.

В працях [2] та [7] автором проведено дослідження різноманітних типів колісних рушіїв та сформовано математичні моделі, які дозволяють враховувати параметри колеса та типи шин, що використовуються в аграрній техніці. При цьому визначення основних параметрів взаємодії колісного рушія з агрофоном проводиться, виходячи з математичної моделі визначення площі контакту конкретного колеса. Також в даній праці доволі велика увага приділена вибору параметрів шин тракторів для різних умов використання з описом рівнянь визначення площі контакту колеса з ґрунтом та величини ущільнення ґрунту. Подібні дослідження наведено в праці [4]. Водночас основні параметри впливу на ущільнення агрофону та інші параметри впливу колісного рушія трактора розглянуто в праці [6].

Основні параметри шини колеса враховано в праці [3] для визначення сили опору перекочування. Встановлено основну залежність сили опору перекочування від діаметру колеса, ширини колеса, коефіцієнта ребристості та інших параметрів колісного рушія аграрної техніки. При цьому використовується рівняння визначення площі контакту колеса з врахуванням швидкості руху, коефіцієнта зминання шини та інших параметрів.

При визначенні сили опору перекочування необхідно враховувати і інші параметри, такі як буксування чи юз. Так в праці [5] наведено математичну модель, яка описує колісний рушій, що працює з різними величинами буксування.

Постановка завдання. Відповідно до результатів проведеного аналізу, основним завданням дослідження є визначення математичних моделей, які дозволяють знайти реальні показники взаємодії колісного рушія з агрофоном (ґрунтом) та врахувати найбільшу кількість показників їх роботи.

Виклад основного матеріалу. Найбільш розповсюдженим типом рушіїв в аграрній техніці є колісні рушії. Подібна тенденція серед виробників техніки та шин сприяє значному вдосконаленню даних рушіїв з точки зору матеріалів шин, конструктивних особливостей та параметрів взаємодії їх з агрофоном.

Різні типи коліс та колісних рушіїв, відповідно до своїх особливостей роботи, мають різні показники взаємодії з агрофоном (ґрунтом). Першочергово є відмінності у показниках взаємодії з агрофоном (ґрунтом), такими як: сила опору перекочування, сила зчеплення, коефіцієнт буксування, а також відмінність є і в площі контакту шини колеса з агрофоном.

Сьогодні розроблено та використовується доволі велика кількість різноманітних математичних моделей аналізу даних показників взаємодії колеса з агрофоном (ґрунтом). При цьому всі показники у своїй більшості визначаються з рівнянь площі контакту шин аграрної техніки з агрофоном (ґрунтом).

Відповідно до цього існують загальні методики визначення площі контакту шини аграрної техніки без врахування особливостей колісного рушія, що призводить до неточностей при визначенні параметрів взаємодії рушія з агрофоном (ґрунтом). Виходячи з цього використання загальної методики визначення основних параметрів взаємодії з агрофоном (ґрунтом) неможливо, адже при цьому не будуть враховані всі особливості не лише конструкції шини, а і відповідно особливості колеса рушія.

Основні дослідження в даному напрямку зосереджені фактично лише на параметрах шини аграрної техніки та їх впливу на ущільнення агрофону (ґрунту) з визначенням площі контакту. Так в праці [2] основна увага приділена вибору параметрів шин тракторів для реальних умов використання з описом рівнянь визначення площі контакту колеса з ґрунтом та величини ущільнення.

Більшість методик, що використовується для визначення основних параметрів взаємодії колеса з агрофоном (ґрунтом) є доволі складними та потребують складного моделювання, що відповідно не дає можливості швидкого вирішення проблеми. Водночас більш прості моделі розрахунку не дають необхідного результату, адже в них не закладаються основні показники, що характеризують деформацію шини колеса та агрофону (ґрунту).

Виходячи з цього існують певні математичні моделі, що використовуються в аграрному машинобудуванні для визначення площі контакту шини колеса аграрної техніки з агрофоном. Для загального розуміння особливостей їх використання розглянемо їх загальних опис.

Відповідно до цього найпростішою математичною моделлю є емпірична модель. Дана модель найбільш часто використовується в аграрному машинобудуванні та фактично має найбільше практичне спрямування порівняно з іншими моделями. Емпірична модель визначення площі контакту шини колеса описується наступним рівнянням:

$$\mathrm{A} = \frac{k \cdot \sqrt{W \cdot D}}{p^b}, \tag{1}$$

де k – емпіричний коефіцієнт, який має залежність від твердості агрофону (ґрунту) та типу шини; W – навантаження на колесо, Н; D – діаметр шини колеса, м; p – тиск повітря в шині, кПа; b – показник ступеня, який знаходиться у межах 0,4–0,8.

Для даної математичної моделі виведені типові значення коефіцієнту k, з врахуванням особливостей агрофону (ґрунту). Водночас взято за тип агрофону (ґрунту) наступні показники: дуже м’який ґрунт (k = 3,2–3,8), ґрунт середньої твердості (k = 2,5–3,0), тверда стерня або сухий ґрунт (k = 1,8–2,2), дорога або асфальт (k = 1,3–

1,6), сніг (k = 0,1–3,5), болото (k = 0,5–1,5). При цьому показник ступеня для кожного з даних агрофонів обирається у залежності від умов, чим менша твердість ґрунту, тим менший даний показник.

Ще більш простою формулою визначення площі контакту шини колеса аграрної техніки, яку доволі часто користуються у польових умовах є наступна:

$$A = W \cdot k, \tag{2}$$

де W – навантаження на колесо, кг; k – коефіцієнт, що враховує, яке навантаження (кг) припадає на 1 см^2.

Відповідно до цього для кожного агрофону (ґрунту) є певні межі коефіцієнту k. Водночас для м'якого ґрунту коефіцієнт k знаходиться в межах 2,2–2,8 см^2/кг, для середнього по твердості ґрунту – 1,8–2,2 см^2/кг, для твердого ґрунту – 1,4–1,8 см^2/кг та відповідно для доріг – 1,0–1,3 см^2/кг. В коефіцієнті k, що використовується в рівнянні (2), також враховано тиск в шині колеса аграрної техніки.

Необхідно також зазначити, що попередні рівняння (1) та (2) фактично не враховують всіх сучасних умов використання колеса аграрної техніки, а також не дають змоги враховувати всі особливості конструкції шини та колеса. Відповідно використання даних формул для визначення площі контакту при проведенні детального аналізу є малоефективним.

В проведенні наукових розрахунків дослідження взаємодії колеса з агрофоном (ґрунтом), а також в стандартах ASABE, використовують так звану «класичну теорію», яка ґрунтується на математичній моделі Bekker. В даній математичній моделі площа контакту шини колеса аграрної техніки з агрофоном враховується через значення глибини занурення. Основним рівнянням даної математичної моделі є:

$$A = b \cdot L, \tag{3}$$

де b – ширина шини, м; L – довжина контакту шини з агрофоном (ґрунтом), м.

Водночас довжина контакту шини з агрофоном (ґрунтом) визначається з даного рівняння:

$$L = 2 \cdot \sqrt{D \cdot z - z^2} = 2 \cdot \sqrt{D \cdot z}, \tag{4}$$

де D – діаметр колеса аграрної техніки, м; z – глибина занурення колеса, м.

Рівняння (4) використовується за умови, що значення глибини занурення колеса є меншим за радіус колеса ($z < R$), за інших умов використання дане рівняння є недоцільним.

Глибина занурення колеса в агрофон (грунт) визначається з рівняння:

$$z = \left(\frac{W}{b \cdot (k_c + b \cdot k_\phi)}\right)^n, \tag{5}$$

де W – навантаження на колесо, Н; k_c, k_ϕ – модулі деформації ґрунту, що залежать від його твердості; n – показник деформації, що знаходиться в межах 0,5–1,0.

Модулі деформації k_c та k_ϕ для різних типів ґрунтів обираються з типових значень. Так для вологого суглинку значення k_c становить 10–30 кН/М$^{n+1}$, а значення k_ϕ – 800–1500 кН/М$^{n+2}$, для сухої стерні – k_c = 50–150 кН/М$^{n+1}$, k_ϕ = 1500–3000 кН/М$^{n+2}$, для піщаного ґрунту – k_c = 10–20 кН/М$^{n+1}$, k_ϕ = 1000–2000 кН/М$^{n+2}$.

Основною проблемою математичної моделі Bekker є те, що вона фактично не враховує особливості деформації шини колеса аграрної техніки. Відповідно до цього найбільш точною моделлю для визначення площі контакту колеса з агрофоном (ґрунтом) є модель Wong-Reece. Дана модель враховує деформацію еластичних шин аграрної техніки одночасно з деформацією агрофону (ґрунту).

Для визначення довжини контакту колеса з еластичною шиною за моделлю Wong-Reece використовують рівняння:

$$L = 2 \cdot \sqrt{(\delta_r + \delta_s) \cdot D \cdot \frac{1-\delta_r}{2R}}, \quad (5)$$

де δ_r – радіальна деформація шини колеса; δ_s – занурення колеса в агрофон (ґрунт); R – радіус колеса, м;

$$\delta_r = W \cdot \frac{1+1{,}27 \cdot \frac{v^2}{c}}{b \cdot k_t}, \quad (6)$$

$$\delta_s = \left(\frac{W}{b \cdot c_g \cdot L}\right)^{\frac{1}{ng}}, \quad (7)$$

де k_t – жорсткість каркасу шини колеса, Н/м; c_g – жорсткість агрофону.

Математична модель Wong-Reece покладена в основну програмного забезпечення, яке використовується на різних платформах типу Tyre / Track-Soil Interaction (TT-SI), ADAMS, SoilContact (MATLAB).

Для конкретного типу шини колеса аграрної техніки доволі часто використовують поліноміальні апроксимації. Так для шин IF/VF з шириною 650–900 мм використовують наступне рівняння визначення площі контакту:

$$\mathrm{A} = a \cdot W^b \cdot p^{-c} \cdot H^d, \quad (8)$$

де a, b, c, d – типові коефіцієнти для шин типу IF/VF; H – твердість ґрунту, МПа;

Відповідно до наведеного аналізу, вибір методу та особливостей розрахунку з використанням наведених математичних моделей виконують залежно від мети розрахунку, особливостей побудови моделі та необхідної швидкості проведення розрахунків.

Відповідно до проведеного розрахунку площі контакту можна виконати епюру тиску колеса аграрної техніки на агрофон (ґрунт). Епюра тиску є певним графічним зображенням розподілу нормальних напруг (тиску) по площі контакту шини з агрофоном (ґрунтом). Епюра тиску фактично має доволі складну форму, яка має відмінності між рухомим та нерухомим колесом.

Під нерухомим колесом (статичне навантаження): епюра тиску зазвичай близька до рівномірної або має невелику підвищену напругу в центрі сліду (залежно від конструкції шини та агрофону (ґрунту)). Під колесом, що рухається (динамічне навантаження): виникає виражений асиметричний розподіл тиску через сили інерції маси ґрунту та деформаційно-швидкісні властивості покришки.

Для подальшого аналізу пропонується навести спрощене схематичне зображення типової епюри (рис. 1).

Відповідно до рисунку 1 спрощена типова епюра має вигляд ексцентрично навантаженої параболи або трапеції з різким зростанням на передній кромці контакту та плавним спадом на задній кромці. Основними зонами та особливостями даної епюри є:

1. Фронтальна зона (передній край сліду, т. А). В даній зоні тиск є максимальним (може у 2–4 рази перевищувати середній тиск). Основною причиною виникнення такого значення тиску є маса ґрунту, що знаходиться попереду шини. Дана маса ґрунту має інерцію і чинить різкий опір його «втискуванню». При цьому колесо також «набігає» на нерухомий ґрунт, створюючи хвилю стиснення.

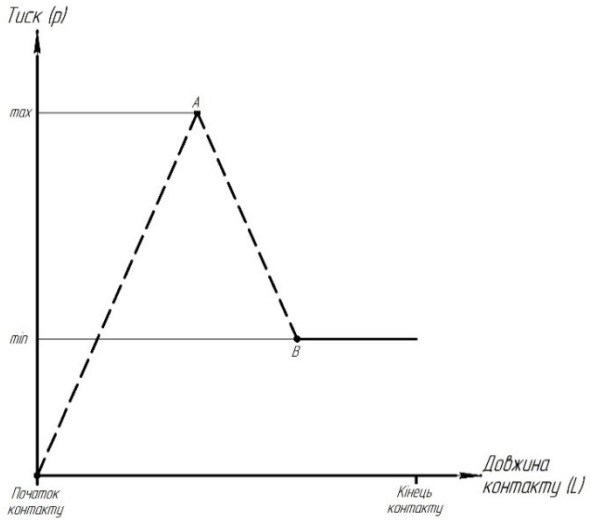

Рисунок 1 – Спрощене схематичне зображення типової епюри тиску колеса аграрної техніки на агрофон (ґрунт)

Джерело: розроблено авторами

2. Центральна зона (між т. А і В). В даній зоні тиск швидко зменшується від максимуму до значення, близького до середнього або нижче. В даній зоні відбувається основний контакт протектора з ґрунтом та відповідно передача тягового зусилля.

3. Задня зона (задній край сліду, т. В). Дана зона характеризується мінімальним тиском. При цьому деформований ґрунт починає відновлювати свою форму, «підштовхуючи» шину. Енергія, накопичена при стисненні, частково повертається.

Як видно, даний графік має певну асиметрію, яка пояснюється тим, що максимум тиску зміщений до передньої частини контакту. Відповідно до цього чим вища швидкість руху колісної аграрної техніки та жорсткіша шина, тим асиметрія буде більшою.

До основних чинників, що мають вплив на форму та розміри епюри відносяться:

- внутрішній тиск у шині;
- швидкість руху;
- жорсткість каркаса шини;
- малюнок протектора;
- експлуатаційні розміри шини;
- властивості ґрунту;
- вертикальне навантаження на колесо.

Відповідно до цих факторів, чим вище внутрішній тиск у шині, тим вона жорсткіша і тим вище пікове навантаження на передній кромці. Зниження тиску (при допустимих межах) покращує рівномірність розподілу. Також зі збільшенням швидкості руху колісної аграрної техніки зростають динамічні навантаження, асиметрія епюри посилюється, пік тиску зростає. Це одна з причин того, що рух по ґрунту на високих швидкостях є особливо шкідливим.

Не менш важливими є і конструктивні показники шини такі, як жорсткість каркасу шини та малюнок протектора. Шини з більш еластичним каркасом (зменшеного тиску, радіальні) мають більш рівномірну епюру тиску, ніж жорсткі (діагональні). Водночас «агресивний» протектор шини також може створювати місцеві піки тиску в зоні зачеплення ґрунтозачепів, що також має вплив на показники взаємодії колеса з агрофоном (ґрунтом).

Відповідно до вищенаведеного, конструктивні особливості колісного рушія та навантаження на колесо також мають значний вплив на показники взаємодії з

агрофоном (ґрунтом). Відповідно до цього збільшення навантаження на колісний рушій (колесо) збільшує площу контакту і абсолютні значення тиску, але загальна форма епюри зберігається.

Загалом при проведені дослідження взаємодії колісного рушія з агрофоном (ґрунтом) необхідно обов'язково враховувати його властивості.

Відповідно до праці [3], знаючи основні параметри площі контакту, можна визначити більш точно опір перекочуванню колеса аграрної техніки, що описується рівнянням:

$$f = \frac{F_f \cdot 100}{m}, \tag{9}$$

де F_f – сила опору перекочування колеса, Н; m – маса колісної техніки, кг.

Не менш важливими при аналізі площі контакту та ущільнення агрофону (ґрунту) є величина буксування та юзу. Дані значення мають також негативний вплив на техніко-експлуатаційні показники роботи аграрної техніки.

Теоретично буксування залежно від пройденої відстані можна описати умовою:

$$S < 2\pi Rn, \tag{10}$$

де S – пройдена відстань аграрною технікою, м; n – кількість обертів колеса на певній відстані S, обертів.

При цьому виникнення юзу описується зворотною умовою:

$$S > 2\pi Rn. \tag{11}$$

Відповідно до наведених рівнянь (10) та (11) бачимо, що буксування та юз є доволі негативними значеннями. Водночас у колісної аграрної техніки при виконанні технологічних операцій по вирощуванню різноманітних культур більше зустрічається буксування (особливо при проведенні обробітку ґрунту). Юз фактично у більшості ситуацій виникає при проведенні транспортних робіт коли відбувається часткове чи повне блокування обертання колеса (наприклад блокування гальмами). При цьому аграрна техніка під дією сили інерції продовжує рух. Також юз виникає при передачі крутного моменту від колеса іншим робочим органам аграрної техніки, наприклад, висівним апаратам.

Якщо негативний вплив від буксування спрямований на зростання витрати палива, втрату потужності, зниження продуктивності та прискорення зносу шин, то юз фактично має найбільший негативний вплив на нерівномірність зносу шин та навантаження на трансмісію аграрної техніки. Водночас з безпекової точки зору юз здатен призвести до повної втрати керованості аграрною технікою.

При врахуванні всіх аспектів взаємодії колісного рушія (колеса) аграрної техніки з агрофоном не менш важливим показником є бічне зчеплення колеса з агрофоном. Бічне зчеплення має найбільший вплив за умови перпендикулярного зміщення, коли колесо рухається під кутом до своєї площини обертання. В подібних ситуаціях виникає бічне зчеплення або поперечне зчеплення.

Коефіцієнт бічного зчеплення ($\mu_{бічне}$) колеса зазвичай значно нижчий, ніж коефіцієнт поздовжнього зчеплення. Так, наприклад, якщо шина колеса має μ = 0,8 для гальмування, то її бічне зчеплення може бути близько $\mu_{бічне}$ = 0,6...0,7.

Ключовим поняттям при аналізі бічного зчеплення є кут бічного введення. Відповідно кут бічного введення є кутом між напрямком руху колеса і площиною його обертання. Від величини даного кута також залежить і сила бічного зчеплення, яка характеризує коефіцієнт бічного зчеплення.

За умови, коли кут бічного уведення має великі значення, відбувається бокове ковзання (занос) колеса аграрної техніки. Всі ці параметри мають значний вплив на особливості взаємодії колісної аграрної техніки з агрофоном (ґрунтом) при виконанні

різноманітних технологічних операцій в сільському господарстві.

На всі ці параметри мають значний вплив конструктивні параметри колеса, його тип та інші показники аграрної техніки. Врахування всіх параметрів потребує значного дослідження та моделювання через визначення основних показників взаємодії колісного рушія з агрофоном (ґрунтом).

Висновки. В більшості літературних джерел взаємодія колісного рушія з агрофоном (ґрунтом) описується через площу контакту колеса з агрофоном (ґрунтом). Водночас використовуються різноманітні математичні моделі, які за своєю структурою та змістом можуть бути простими та складними. Складні моделі враховують більшу кількість параметрів колеса аграрної техніки та показників взаємодії з агрофоном (ґрунтом). Але розв'язання подібних задач потребує доволі великих розрахункових зусиль. Прості моделі використовуються для швидкого розрахунку у польових умовах, адже вони не потребують великої кількості параметрів та, по суті, дають доволі приблизні значення.

Проектування взаємодії колеса з агрофоном зводиться до отримання значень основних показників (опору перекочування, зчеплення, бічного зчеплення та ін.) та епюри тиску колеса на агрофон (ґрунт). Епюра тиску колеса рухомої аграрної техніки на агрофон є високоасиметричною з чітко вираженим максимумом у передній частині контакту. Ця динамічна характеристика є основним фактором утворення колії, визначає опір перекочування та ефективність техніко-експлуатаційних показників роботи аграрної техніки. Для мінімізації шкідливого впливу на агрофон (ґрунт) сучасна аграрна техніка використовує шини, спроектовані для максимального вирівнювання цієї епюри.

Проведення подальших досліджень потребує створення математичної моделі, яка врахує максимальну кількість параметрів та буде максимально простою для розрахунків. При цьому отриману математичну модель обов'язково потрібно підтвердити проведенням польових досліджень в реальних умовах використання колісних рушіїв.

Список літератури

1. Особливості сучасної класифікації ходових систем аграрної техніки. Зубко В. М., Чепіжний А. В., Коваленко В. Є., Шутко В. В. *Вісник Сумського національного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2025. №4. С. 64–69. https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.9.
2. Ребров О. Ю. Вибір параметрів шин сільськогосподарських тракторів. Харків : Видавець: О.А. Мірошніченко, 2021. 304 с.
3. Визначення коефіцієнта опору перекочування сучасної аграрної техніки на різних агрофонах. / Чепіжний А. В., Зубко В. М., Коваленко В. Є., Шутко В. В. *Вісник Сумського національного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2024. №3(57). С. 59–68. https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.9
4. Теоретичне обґрунтування типажу колісних сільськогосподарських тракторів для України / Адамчук, В. В., Булгаков, В. М., Надикто, В. Т., Крючев, В. М. *Таврійський державний агротехнологічний університет, Вісник аграрної науки.* 2017. №95(1). С.43–47.
5. Лебедев, А. Т., Калінін, Є. І., Шуляк, М. Л. Опір перекочування колеса, що працює з буксуванням, *Сільськогосподарські машини*. Луцьк. 2015. №32, С.109–115.
6. Лебедєв, С. А. Підвищення агроекологічних якостей сільськогосподарських колісних тракторів. *Техніка і технологія АПК*. 2016. №1, С.16–21.
7. Ребров, О. Ю. Теоретичне обгрунтування основних параметрів колісних сільськогосподарських тракторів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2017. №8. С.243–254.

References

1. Zubko, V. M., Chepizhnyi, A. V., Kovalenko, V. E., & Shutko, V. V. (2025). Osoblyvosti suchasnoi

klasyfikatsii khodovykh system ahrarnoi tekhniky [Features of the modern classification of running systems of agricultural machinery]. Visnyk Sumskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv, (4), s. 64–69 (in Ukrainian). https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.9

2. Rebrov, O. Yu. (2021). Vybir parametriv shyn silskohospodarskykh traktoriv [Selection of tire parameters for agricultural tractors]. Kharkiv, Miroshnychenko O. A., 302 (in Ukrainian).
3. Chepizhnyi, A. V., Zubko, V. M., Kovalenko, V. Ye., Shutko, V. V. (2024). Vyznachennia koefitsiienta oporu perekochuvannia suchasnoi ahrarnoi tekhniky na riznykh ahrofonakh [Determination of the overflow resistance coefficient of modern agricultural techniques on different agrophones]. Sumy, Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu, 3(57), 59–68 (in Ukrainian). https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.9
4. Adamchuk, V. V., Bulhakov, V. M., Nadykto, V. T., Kriuchev, V. M. (2017). Teoretychne obgruntuvannia typazhu kolisnykh silskohospodarskykh traktoriv dlia Ukrainy [Theoretical justification of the type of wheeled agricultural tractors for Ukraine]. Tavriiskyi derzhavnyi ahrotekhnolohichnyi universytet, Visnyk ahrarnoi nauky, 95(1), 43–47 (in Ukrainian).
5. Lebedev, A. T., Kalinin, Ye. I., Shuliak, M. L. (2015). Opir perekochuvannia kolesa, shcho pratsiuie z buksuvanniam [Rolling resistance of a wheel operating with skidding]. Lutsk, Silskohospodarski mashyny, 32, 109–115 (in Ukrainian).
6. Lebediev, S. A. (2016). Pidvyshchennia ahroekolohichnykh yakostei silskohospodarskykh kolisnykh traktoriv [Improving the agroecological qualities of agricultural wheeled tractors]. Tekhnika i tekhnolohiia APK, 1, 16–21 (in Ukrainian).
7. Rebrov, O. Yu. (2017). Teoretychne obhruntuvannia osnovnykh parametriv kolisnykh silskohospodarskykh traktoriv [Theoretical justification of the basic parameters of wheeled farm tractor]. Kharkiv, Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv, 8, 243–254 (in Ukrainian).

Andrii Chepizhnyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetiana Khvorost,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
Serhii Chugaiev, PhD agrical. sci.
Viktor Yegorovich von Graff Velykoanadolsk Forestry Technical College, Apostolove, Dnipropetrovsk Oblast, Ukraine
Vladyslav Kovalenko, **Vitalii Shutko**
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Analysis of the Main Indicators and Mathematical Models of the Interaction of the Wheel with the Agrobackground (Soil)

The article considers the main aspects of the interaction of wheel drives of agricultural machinery with the agrobackground. A basic analysis of mathematical models for determining the contact area of the wheel with the agrobackground (soil) is carried out, taking into account the analysis of the features of their use when performing calculations. The advantages of simple mathematical models that allow for quick calculations in field conditions are taken into account, and mathematical models that allow for scientific research taking into account the maximum number of interaction parameters are also given. It is determined that the most effective mathematical model for describing the interaction of the wheel with the agrobackground (soil) are models that take into account the characteristics of the wheel and the agrobackground. In this case, it is necessary to take into account the deformations of the wheel tire and the soil.

Most mathematical models are used as the basis for software that allows for modeling various processes of interaction of the wheel drive with the agrobackground (soil). The main platforms on which such software is implemented are platforms such as Tyre / Track-Soil Interaction (TT-SI), ADAMS, SoilContact (MATLAB).

For general analysis, a simplified schematic representation of the pressure diagram of the wheel of agricultural machinery on the agrobackground (soil) was constructed. The main zones of influence of the wheel on the agrobackground (soil) were described. Based on the obtained data on the contact area, the parameters of the interaction of the wheel with the agrobackground are given, which are described by the rolling resistance force, the wheel contact area, as well as such indicators as slippage and yaw. The main influence of these indicators on the technical and operational performance of modern agricultural machinery is given.

wheel, yaw, lateral grip, diagram, pressure, soil, agrobackground, rolling resistance, unit, contact area, speed, mathematical model, software

Одержано (Received) 21.06.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 23.06.2026*
Дата публікації (Publication Date) 30.06.2026 *Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026*