

О.Ю. РЕБРОВ, М.М. МАЛЬКО, А.О. РЕБРОВА, М.Є. ЯКУНІН

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТИПОРОЗМІРІВ ШИН ДЛЯ КОМПЛЕКТУВАННЯ КОЛІСНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТРАКТОРІВ

В статті наведена методика визначення раціональних типорозмірів шин для комплектування колісних сільськогосподарських тракторів, яка включає декілька етапів. На першому етапі з широкої номенклатури шин виключаються з розгляду типорозміри, що не задовольняють композиційним обмеженням за зовнішнім діаметром, шириною профілю та посадковим діаметром. На другому етапі виключаються з розгляду шини, які не пройшли перевірку за вантажопідйомністю та оціночною величиною максимального тиску на ґрунт. На третьому етапі визначаються показники чистої продуктивності та погектарної витрати палива при відвальному та безвідвальному обробітку ґрунту. Разом з цим, за уточненими методиками визначається максимальний тиск на ґрунт та ймовірність виконання агроекологічних вимог трактором щодо максимального тиску на ґрунт у весняний та літньо-осінній періоди.

На підставі отриманих даних сформовано критерій ефективності трактора на відповідних шинах, що включає складові тягової ефективності та екологічної безпеки рушія. За запропонованим критерієм оцінюється перспективність застосування наявних типорозмірів шин, що пройшли зазначені перевірки. Для отримання повної інформації методика передбачає також визначення доцільності застосування здвоєних або зтроєних шин та баластування трактора. За запропонованою методикою проведено дослідження перспективності застосування типорозмірів шин для трактора ХТЗ-160У.

Ключові слова: колісний трактор, максимальний тиск на ґрунт, тракторна шина, баластування трактора, здвоєні шини, тягова ефективність.

O. REBROV, M. MALKO, A. REBROVA, V. YAKUNIN

METHOD OF DETERMINING OF REASONABLE TIRE SIZES FOR WHEELED AGRICULTURAL TRACTORS

The article presents the method of determining rational tire sizes for wheeled agricultural tractors, which includes several stages. At the first stage, from the broad nomenclature of tires, the sizes that do not satisfy the compositional restrictions on the outer diameter, profile width and mounting diameter are excluded from consideration. At the second stage, tires that have not passed the load capacity and estimated value of the maximum pressure on the soil are excluded from consideration. At the third stage, the indicators of net productivity and fuel consumption per hectare are determined in fallow and no-fall tillage. Along with this, the maximum pressure on the soil and the probability of fulfilling the agro-ecological requirements by the tractor regarding the maximum pressure on the soil in the spring and summer-autumn periods are determined according to the specified methods.

On the basis of the obtained data, a tractor efficiency criterion was formed on the appropriate tires, which includes the components of traction efficiency and environmental safety of the tractor. According to the proposed criterion, the perspective of using the existing tire sizes that have passed the specified inspections is evaluated. To obtain complete information, the method also involves determining the expediency of using dual or triple tires and ballasting the tractor. According to the proposed method, a prospective study of the use of tire sizes for the KhTZ-160U tractor was conducted.

Key words: wheeled tractor, maximum soil pressure, tractor tire, tractor ballasting, ballast weights, dual tires, traction efficiency.

Вступ.

При створенні нових конструкцій колісних сільськогосподарських тракторів або їх модернізації виникає питання комплектування трактора перспективними типорозмірами шин. Обґрунтування вибору шин має декілька аспектів, оскільки тракторні шини взаємодіють з ґрунтовим середовищем і забезпечують виконання сільськогосподарських технологій. Дослідження показують [1, 2], що за рахунок обґрунтованого вибору шин можна забезпечити усереднене підвищення ефективності трактора за рядом показників на величину до 11-14%, а за окремими показниками на 15-26%. При цьому рух трактора по сільськогосподарським угіддям може супроводжуватися надмірним пресуванням та ущільненням ґрунту. Для запобігання переущільненню ґрунту, і, як наслідок, його поступової деградації, що неодмінно впливає на родючість ґрунтів та вартість сільськогосподарської продукції, в Україні введений

в дію стандарт ДСТУ 4521:2006 «Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт» [3]. Стандарт обмежує максимальний тиск на ґрунт залежно від його гранулометричного складу, вологості та пори року. При обґрунтованому виборі тракторних шин можна досягти суттєвого зниження максимального тиску на ґрунт та підвищення частки території України, де трактор може експлуатуватися без порушення агроекологічних норм ДСТУ [3] в декілька разів [1, 2].

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

При виконанні тракторами польових технологічних операцій ефективність та безпечність їх роботи визначається процесами, що протікають при взаємодії шин з ґрунтом. Суттєве підвищення ефективності колісного трактора, яке визначається збільшенням продуктивності та зменшенням витрати палива, можливе за рахунок баластування [4-6]. Але надмірне баластування, призводить до переущільнення ґрунтів, їх подальшій деградації та втраті врожайності сільськогосподарських культур [7-9].

Таким чином, виникає протиріччя між підвищенням ефективності трактора за рахунок збільшення його зчпної ваги та виконанням агроекологічних вимог і збереженням родючості та потенціалу ґрунтів.

З огляду на зазначене протиріччя, актуальним є питання створення методики визначення перспективних до застосування тракторних сільськогосподарських шин, яка базувалася б на принципах одночасного забезпечення агроекологічних вимог щодо дії ходових систем на ґрунт та підвищення до максимально досяжних потенційних тягових властивостей трактора при виконанні технологічних операцій механічного обробітку ґрунту.

Мета та постановка задачі дослідження.

Метою даної роботи є розробка методики визначення перспективних до застосування шин для створюваних або модернізованих колісних сільськогосподарських тракторів, яка, на основі науково-обґрунтованих підходів, дасть змогу отримувати необхідні розрахункові дані для прийняття рішень.

Для досягнення поставленої мети вирішувались завдання: узагальнення наявних компонувальних, навантажувальних, розрахункових і агроекологічних обмежень щодо типорозмірів шин та їх характеристик; моделювання процесів реалізації трактором взаємодії з ґрунтовим середовищем; виключення з розгляду типорозмірів шин, що не задовольняють обмеженням; формування показників ефективності та екологічної безпеки трактора при комплектуванні рядом перспективних типорозмірів шин; аналіз показників на прикладі трактора ХТЗ-160У при застосуванні одинарних, здвоєних та зтросєних шин при експлуатаційній масі та при максимальному баластуванні; виявлення найбільш перспективних до застосування типорозмірів шин.

Основний матеріал та результати дослідження.

Розглянемо основні принципи та обмеження, які мають місце при виборі типорозмірів шин. До компонувальних обмежень слід віднести наступне. В першу чергу це – зовнішні діаметри передніх і задніх шин D_1, D_2 , які обмежуються максимальними значеннями D_{1lim}, D_{2lim} для забезпечення компоновки кабіни, мінімального радіусу повороту, статичної стійкості. Також, зазвичай, лімітується максимальна ширина профілю шин b_{1lim}, b_{2lim} , що тісно пов'язано з питаннями реалізації мінімального радіусу повороту, можливості міжрядного обробітку при одинарній або здвоєній комплектації (максимум 480-520 мм), необхідності задовольнити транспортному габариту трактора. Третім лімітованим показником може бути мінімальні посадкові діаметри передніх і задніх шин $D_{п1lim}, D_{п2lim}$, які не можуть бути занадто малими з компонувальних міркувань для розміщення колісних редукторів та гальм.

На першому етапі виключаються з розгляду типорозміри шин, що не задовольняють компонувальним обмеженням:

$$D_{1,2} \leq D_{1,2lim}; \quad b_{1,2} \leq b_{1,2lim}; \quad D_{п1,2} \geq D_{п1,2lim} \quad (1)$$

Для тракторів класичної компоновки 4К4а (MFWD – Mechanical front wheel drive tractors)

додатковим обмежуючим фактором є відповідна різниця ΔRCI індексів довжини окружності кочення шин (RCI – Rolling circumference index). Величина ΔRCI встановлюється на стадії компоновки трактора та реалізується відповідною кінематикою міжосьового приводу.

У першому наближенні визначається максимальна навантага на шину переднього та заднього моста в статичному положенні та при максимальній силі тяги трактора, відповідно:

$$G_{k1\max} = \frac{G \cdot l_2}{2 \cdot L}; \quad G_{k2\max} = \frac{G \cdot (l_1 + \varphi_{\text{кр}} \cdot h_{\text{кр}})}{2 \cdot L} \quad (2)$$

де l_1, l_2, L – відстань від осі переднього, заднього моста до центру тяжіння та повздожня база трактора, відповідно; $\varphi_{\text{кр}}, h_{\text{кр}}$ – коефіцієнт використання зчпної ваги трактора при максимальній силі тяги на гаку та висота її прикладання відносно опорної поверхні.

Внутрішній тиск в шині, відповідно до максимальної радіальної навантаги на шину G_k (2):

$$p_{\text{ш}} = p_{\text{min}} + \frac{(p_{\text{max}} - p_{\text{min}})}{(Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}})} \cdot (G_k - Q_{\text{min}}) \quad (3)$$

де $p_{\text{min}}, p_{\text{max}}$ – мінімально допустимий та максимально допустимий внутрішній тиск в шині; $Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}$ – допустима навантага при мінімально допустимому та максимально допустимому внутрішньому тиску в шині.

З розгляду виключаються шини, що вимагають занадто високого внутрішнього тиску, який, в принципі, не передбачає їх використання на сільськогосподарських польових операціях. Шини вибраковуються за умови:

$$p_{\text{ш1,2}} \leq p_{\text{шlim}} \quad (4)$$

де $p_{\text{шlim}}$ – граничне значення внутрішнього тиску повітря, коли шина ще може використовуватися на сільськогосподарських польових операціях, $p_{\text{шlim}} = 160$ кПа.

Наступним суттєвим обмеженням, що може заважати використанню шин на польових сільськогосподарських операціях, є виконання вимог ДСТУ 4521:2006 «Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт» [3] щодо максимального тиску на ґрунт.

В першому наближенні максимальний тиск на ґрунт можна визначити відповідно ДСТУ 4428:2005 «Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт» [10], використовуючи значення максимальної радіальної навантаги G_k (2):

$$q_{\text{max}} = \frac{1,5 \cdot G_k}{k_{\Sigma} \cdot k_D \cdot F_F} \quad (5)$$

де k_{Σ} – коефіцієнт, що враховує умови роботи рушія; k_D – коефіцієнт, що враховує зовнішній діаметр шини; F_F – контурна площа плями контакту шини.

Величина контурної площі контакту шини F_F вказується в технічних даних виробника та відповідає режиму експлуатації з індексом швидкості A_6 , тобто, при тривалій дії значного крутного моменту.

Таким чином, з розгляду можна виключити шини, що не задовольняють умові:

$$q_{\text{max}} < [q_{\text{max}}] \quad (6)$$

де $[q_{\text{max}}]$ – допустимий тиск на ґрунт (нормативна величина для одиночного трактора) [3].

Рівень допустимого тиску на ґрунт $[q_{\text{max}}]$ визначається, в першу чергу, його станом та вологістю. При обґрунтуванні узагальненого рівня допустимого тиску на ґрунт без прив'язки до конкретних ґрунто-кліматичних умов можна оперувати показником ймовірності виконання агроекологічних вимог на території України [11], а також узагальненими даними щодо технічного рівня сучасного тракторобудування щодо агроекологічного аспекту [12].

Надалі для реалізації методики визначення раціональних типорозмірів шин запроваджується математична модель тракторних сільськогосподарських шин [1, 2], технічні показники яких необхідно в обов'язковому порядку ідентифікувати.

Для визначення показників трактора при комплектації відповідними шинами визначається розрахунковий тиск в шинах з урахуванням можливості здвоєння шин:

$$p_{\text{пш1,2}} = p_{\text{min1,2}} + \frac{(p_{\text{max1,2}} - p_{\text{min1,2}})}{(Q_{\text{max1,2}} - Q_{\text{min1,2}}) \cdot k_{\text{dual1,2}}} \cdot \left(\frac{G_{k1,2}}{\text{dual}_{1,2}} - Q_{\text{min1,2}} \cdot k_{\text{dual1,2}} \right) \quad (7)$$

де $\text{dual}_{1,2}$, $k_{\text{dual1,2}}$ – кількість шин в колісній системі (1, 2 або 3 – одинарні, здвоєні або зтроєні) та коефіцієнт зміни допустимої навантаги при одинарних, здвоєних та зтроєних шинах (1,0; 0,88; 0,82) для передніх та задніх шин, відповідно.

При застосуванні здвоєних або зтроєних шин мінімально допустимий внутрішній тиск в шині $p_{\text{min,dual}}$ для сучасних конструкцій може становити 40-60 кПа. Тому, в остаточному підсумку необхідний внутрішній тиск в шині визначається як максимум з трьох:

$$p_{\text{ш1,2}} = \max(p_{\text{пш1,2}}; p_{\text{min1,2}}; p_{\text{min,dual1,2}}) \quad (8)$$

Слід відзначити, що для коректного розрахунку вихідні дані шин мають містити величину внутрішнього тиску p_{min} , що відповідає мінімально допустимому тиску при здвоєнні/зтроєнні, а величина навантаги відповідати Q_{min} для одинарної шини та індексу швидкості A_6 . При такому алгоритмі, якщо розрахунковий тиск в шині менше за мінімально допустимий, це свідчить про запас вантажопідйомності шини, який може бути реалізований за рахунок баластування трактора.

Для подальшого аналізу ефективності шин моделюється зовнішня швидкісна характеристика тракторного двигуна, яка може бути апроксимована, наприклад, сплайном. Використання зовнішньої швидкісної характеристики є класичним в теорії трактора, оскільки дає розрахункове уявлення про потенційно досяжні тягові показники трактора.

Для контролю рівня навантаження шин в тяговому технологічному процесі використовується коефіцієнт навантаження шини (%):

$$k_{\text{п1,2}} = \frac{G_{k1,2}}{[Q]_{\text{пш1,2}} \cdot k_{\text{dual1,2}}} \cdot 100\% \quad (9)$$

де $[Q]_{\text{пш1,2}}$ – допустимі радіальні навантаги на одинарну передню/задню шину при даному тиску повітря $p_{\text{ш1,2}}$:

$$[Q]_{\text{пш1,2}} = Q_{\text{min1,2}} + \frac{(Q_{\text{max1,2}} - Q_{\text{min1,2}})}{(p_{\text{max1,2}} - p_{\text{min1,2}})} \cdot (p_{\text{ш1,2}} - p_{\text{min1,2}}) \quad (10)$$

Максимальна величина $k_{\text{п1,2}}$ не повинна перевищувати 100%, 88% та 82% для одинарних/здвоєних/зтроєних шин, відповідно.

Наступним кроком визначається можливість баластування трактора на обраних шинах за рахунок запасу вантажопідйомності шин. Ступінь баластування розраховується відносно навантаги на шину:

$$\lambda_{b1,2} \leq \frac{[q_{\text{max}}] \cdot k_{\Sigma} \cdot k_{D1,2} \cdot F_{F1,2}}{1,5 \cdot G_{k1,2}} - 1 \quad (11)$$

Величина баласту для окремої шини приймається як мінімальне значення розрахованого ступеня баластування в усьому діапазоні режимів роботи двигуна:

$$G_{bk1,2} = \min(\lambda_{b1,2} \cdot G_{k1,2}) \quad (12)$$

Тоді, вага максимально баластованого трактора з урахуванням виконання умови (6):

$$G_{b0} = 2 \cdot [(G_{k1} + G_{bk1}) \cdot \text{dual}_1 + (G_{k2} + G_{bk2}) \cdot \text{dual}_2 + (\text{dual}_1 - 1) \cdot m_{t1} \cdot g + (\text{dual}_2 - 1) \cdot m_{t2} \cdot g] \quad (13)$$

де $m_{t1,2}$ – маса передніх і задніх шин в зборі з диском та елементами системи здвоєння.

Слід відзначити, що для деяких шин величини ступеня баластування (11) та ваги баласту (12) можуть бути негативними. Тобто, такі шини не мають запасу вантажопідйомності для баластування трактора. Отже, такі шини виключаються з розгляду при виконанні умови:

$$G_{b0} \leq G_0 \quad (14)$$

де G_0 – експлуатаційна вага трактора без баласту.

На цій процедурі виключення з розгляду шин за окремими обмеженнями завершується. Надалі проводяться розрахунки оціночних показників ефективності використання різних типорозмірів шин. Визначається ймовірність виконання трактором на відповідних шинах агроекологічних вимог щодо максимального тиску на ґрунт при виконанні весняних та літньо-осінніх польових операцій [1, 2, 11].

Наступним етапом є розрахунок тягових показників трактора з урахуванням характеристики двигуна, параметрів трансмісії, показників шин, їх взаємодії з ґрунтом та процесів колієутворення.

Тягові показники розраховуються на основі застосування залежності Ханамото [1, 2], що набула широкого вжитку, при кінематично пов'язаному блокованому міжосьовому приводі ведучих мостів. Коефіцієнт буксування переднього мосту розраховуються чисельним методом з рівняння:

$$P_{кдв} = P_{к\phi 1} \cdot \left[1 - \frac{k_c \cdot (1 - \delta_1)}{\delta_1 \cdot a_{k1}} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-\delta_1 \cdot a_{k1}}{k_c \cdot (1 - \delta_1)} \right) \right) \right] + P_{к\phi 2} \cdot \left[1 - \frac{k_c \cdot (1 - (1 - k_n \cdot (1 - \delta_1)))}{(1 - k_n \cdot (1 - \delta_1)) \cdot a_{k2}} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-(1 - k_n \cdot (1 - \delta_1)) \cdot a_{k2}}{k_c \cdot (1 - (1 - k_n \cdot (1 - \delta_1)))} \right) \right) \right] \quad (15)$$

де $P_{кдв}$ – сумарна дотична сила тяги мостів, що визначена по двигуну; $P_{к\phi 1,2}$ – гранична дотична сила тяги ведучих мостів по зчепленню з опорною поверхнею при буксуванні 100%; $a_{k1,2}$ – довжина плями контакту передніх та задніх шин з опорною поверхнею, відповідно; k_n – коефіцієнт кінематичної невідповідності приводів ведучих мостів; k_c – коефіцієнт деформації ґрунту.

$$P_{кдв} = \frac{M_{дв}(\omega) \cdot \eta_T}{G_0} \cdot \left(\frac{2 \cdot G_{k1} \cdot dual_1 \cdot u_1}{r_{k1}} + \frac{2 \cdot G_{k2} \cdot dual_2 \cdot u_2}{r_{k2}} \right) \quad (16)$$

де $M_{дв}(\omega)$ – крутний момент двигуна за зовнішньою швидкісною характеристикою, залежно від кутової швидкості колінчастого валу ω ; η_T – ККД трансмісії трактора; $r_{k1,2}$ – динамічні радіуси шин коліс переднього і заднього мостів; $u_{1,2}$ – передавальне число приводів переднього і заднього мостів.

$$P_{к\phi 1,2} = 2 \cdot \left((C_c \cdot F_{k1,2} + G_{k1,2} \cdot tg(\varphi_c)) \cdot dual_{1,2} \cdot k_{пр1,2} + (dual_{1,2} - 1) \cdot m_{1,2} \cdot g \cdot tg(\varphi_c) \cdot k_{пр1,2} \right) \quad (17)$$

де C_c , φ_c – напруга здвигу в ґрунті та кут внутрішнього тертя в ґрунті; $G_{k1,2}$ – поточна величина радіальної навантаги на шини; $F_{k1,2}$ – поточна величина площі плями контакту шин з ґрунтом; $k_{пр1,2}$ – коефіцієнт, що враховує кількість проходів шин слід по сліду.

$$k_n = \frac{1 - \delta_2}{1 - \delta_1} = \frac{r_{k1} \cdot u_2}{r_{k2} \cdot u_1} \quad (18)$$

Коефіцієнт буксування шин заднього моста трактора:

$$\delta_2 = 1 - k_n \cdot (1 - \delta_1) \quad (19)$$

Дійсна швидкість трактора:

$$V = V_1 = \frac{\omega \cdot r_{k1}}{u_1} \cdot (1 - \delta_1) = V_2 = \frac{\omega \cdot r_{k2}}{u_2} \cdot (1 - \delta_2) \quad (20)$$

Дотичні сили тяги ведучих мостів:

$$P_{k1,2} = P_{к\phi 1,2} \cdot \left(1 - \frac{k_c \cdot (1 - \delta_{1,2})}{\delta_{1,2} \cdot a_{k1,2}} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-\delta_{1,2} \cdot a_{k1,2}}{k_c \cdot (1 - \delta_{1,2})} \right) \right) \right) \quad (21)$$

Сила опору коченню ведучих мостів:

$$P_{f1,2} = 0,81 \cdot \frac{2 \cdot k_0 \cdot k_{np1,2}}{100 \cdot \sqrt{a_{k1,2} \cdot b_{k1,2}}} \cdot b_{k1,2} \cdot h_{r1,2}^2 \cdot dual_{1,2} \quad (22)$$

де k_0 – коефіцієнт об'ємного зминання ґрунту; $b_{k1,2}$ – ширина плями контакту передніх та задніх шин з опорною поверхнею, відповідно; $h_{r1,2}$ – глибина колії після проходження шин переднього та заднього мостів, відповідно визначається розв'язанням рівняння:

$$h_{r1,2} = \sqrt[3]{\frac{G_{k1,2}^2}{\left(\frac{k_0 \cdot k_{np1,2}}{100 \cdot \sqrt{a_{k1,2} \cdot b_{k1,2}}}\right)^2 \cdot b_{k1,2}^2 \cdot D_{1,2} \cdot \left(1 + \frac{f_{ш1,2}}{h_{r1,2}}\right)}} \quad (23)$$

де $f_{ш1,2}$ – радіальна деформація шин, що визначається відповідно моделі тракторної шини [1].

Ширина захвату знаряддя при відвальному полицевому обробітку (оранці):

$$B_v = \frac{P_{k1} + P_{k2} - P_{f1} - P_{f2} - f_{п} \cdot G_{п}}{k \cdot h \cdot (1 + \varepsilon \cdot V^2)} \quad (24)$$

де $f_{п}$, $G_{п}$ – коефіцієнт опору плуга та його вага, відповідно; h – глибина оранки; k , ε – питомий опір та коефіцієнт швидкісних втрат при оранці.

Ширина захвату знаряддя при безвідвальному обробітку (культивуваці):

$$B_k = \frac{P_{k1} + P_{k2} - P_{f1} - P_{f2}}{k_k \cdot (1 + \varepsilon_k \cdot V)} \quad (25)$$

де k_k , ε_k – питомий опір та коефіцієнт швидкісних втрат при культивуваці.

Чиста продуктивність технологічної операції відвального та безвідвального обробітку ґрунту, га/год:

$$S_v = 0,36 \cdot B_v \cdot V; \quad S_k = 0,36 \cdot B_k \cdot V \quad (26)$$

Чиста погектарна витрата палива технологічної операції відвального та безвідвального обробітку ґрунту, кг/га:

$$W_v = \frac{G_t(\omega)}{S_v}; \quad W_k = \frac{G_t(\omega)}{S_k}, \quad (27)$$

де $G_t(\omega)$ – погодинна витрата палива двигуном за зовнішньою швидкісною характеристикою залежно від кутової швидкості колінчастого валу ω .

На цьому розрахунок тягових показників трактора на різних шинах завершується. Наступним кроком визначаються оціночні показники ефективності трактора.

Для узгодження оціночних показників з їх допустимими межами, що визначаються технологічним процесом та загальними вимогами до тракторів, введемо бінарні коефіцієнти K_v , K_{δ} , які характеризують відповідність режиму функціонування трактора вказаним вимогам. Бінарні коефіцієнти дорівнюють 1, якщо режим роботи трактора не виходить за допустимі межі, інакше вони дорівнюють 0. Коефіцієнт K_v сигналізує про відповідність вимогам швидкісного режиму технологічної операції. Для відвального обробітку ґрунту прийнятний допустимий швидкісний діапазон – (1,6...3,0) м/с, а для безвідвального обробітку – (1,6...5,0) м/с. Коефіцієнт K_{δ} сигналізує про відповідність буксування рушіїв переднього та заднього ведучих мостів трактора допустимій межі для колісних тракторів.

З огляду на впроваджені коефіцієнти, усереднене (інтегральне) значення оціночних показників можна представити наступним чином:

$$S_{vi} = \frac{\sum S_v}{\sum K_v \cdot K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}}; S_{ki} = \frac{\sum S_k}{\sum K_v \cdot K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}}; W_{vi} = \frac{\sum W_v}{\sum K_v \cdot K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}}; W_{ki} = \frac{\sum W_k}{\sum K_v \cdot K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}} \quad (28)$$

Для порівняння трактора на різних шинах доцільно використати нормовані показники:

$$S_{vn} = \frac{S_{vi}}{\max(S_{vi})}; S_{kn} = \frac{S_{ki}}{\max(S_{ki})}; W_{vn} = \frac{\min(W_{vi})}{W_{vi}}; W_{kn} = \frac{\min(W_{ki})}{W_{ki}}. \quad (29)$$

Наприкінці отримуємо підсумковий коефіцієнт ефективності трактора на відповідних шинах, що охоплює технологічні процеси оранки та культивуації:

$$K_{ef} = \frac{S_{vn} + S_{kn} + W_{vn} + W_{kn}}{4}. \quad (30)$$

Для урахування складової екологічної безпеки рушія у вигляді ймовірності виконання трактором агроекологічних вимог ДСТУ при виконанні сільськогосподарських операцій у весняний та літньо-осінній періоди впроваджено підсумковий показник:

$$R = \sqrt{K_{ef}^2 + p_{spr}^2 + p_{aut}^2} \quad (31)$$

де p_{spr} , p_{aut} – ймовірність виконання трактором на відповідних шинах агроекологічних вимог ДСТУ у весняний та літньо-осінній періоди.

Відповідно до наведеної методики, були визначені показники R (31) для трактора ХТЗ-160У при комплектуванні одинарними, здвоєними та зтроєними шинами для ваги трактора без баласту та з максимальним баластом (табл. 1). Наведені дані тільки для перших 10 типорозмірів шин, що задовольняють обмеженням. Для кожного варіанту комплектації дані відсортовані за спаданням показника R .

Таблиця 1 – Показники трактора ХТЗ-160У при комплектуванні перспективними шинами

Одинарні шини				Здвоєні шини				Зтроєні шини			
Без баласту		З баластом		Без баласту		З баластом		Без баласту		З баластом	
Код*	R	Код	R	Код	R	Код	R	Код	R	Код	R
374	1,22	568	1,306	374	1,402	374	1,544	374	1,425	374	1,66
375	1,174	375	1,305	375	1,363	375	1,488	375	1,389	375	1,566
568	1,166	374	1,267	568	1,348	568	1,472	568	1,381	568	1,472
691	1,071	691	1,101	704	1,261	691	1,323	79	1,289	690	1,355
505	1,07	10	1,075	10	1,261	10	1,306	691	1,302	704	1,353
79	1,057	505	1,066	691	1,225	79	1,304	704	1,27	691	1,35
537	1,025	704	1,063	79	1,211	704	1,297	10	1,268	79	1,35
76	1,024	76	1,05	77	1,268	641	1,237	77	1,316	10	1,35
704	1,003	79	1	690	1,231	77	1,23	690	1,282	77	1,335
77	0,986	537	0,982	642	1,242	735	1,228	641	1,283	642	1,273

* – код (умовний порядковий номер) типорозміру шини із наявної загальної вибірки, яка містить шини таких виробників як Mitas, Trelleborg, Michelin, GoodYear, Firestone.

Отримані дані свідчать, що застосування здвоєних та зтроєних шин підвищує ефективність трактора не тільки за рахунок покращення екологічного показника, а й за рахунок підвищення тягової ефективності. Сумісне застосування здвоєння/зтроєння та баластування суттєво підвищує ефективність трактора при, практично, незмінному показнику екологічності. Найбільш високі показники ефективності трактор ХТЗ-160У має при комплектуванні шинами 374, 375, 568 (виділені жирним у табл. 1). Ці коди відповідають наступним шинам: 374 – VF600/60 R30 147(D) Michelin Xeobib; 375 – VF600/60 R34 149(D) Michelin Xeobib; 568 – VF600/70 R30 165(D) Mitas HC2000.

Таким чином, обґрунтований вибір шин дає змогу підвищити ефективність трактора за запропонованим показником на величину, що може досягати 20-30%, а при сумісному застосуванні здвоєння/зтроєння і баластування, навіть, більше.

Висновки. Розроблена методика дає змогу здійснити обґрунтований вибір перспективних до застосування тракторних сільськогосподарських шин з широкої номенклатури існуючих типорозмірів. Визначення раціональних типорозмірів шин для комплектування конкретного трактора здійснюється на основі запропонованого критерію, що включає складові тягової ефективності та екологічної безпеки рушія. Перспективні до застосування шини можуть мати на 20-30% вищий запропонований показник ефективності, а при сумісному застосуванні здвоєння/зтроєння і баластування, навіть, більше.

Список літератури

1. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рушіїв сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях обробки ґрунту: дис. ... д-р техн. наук: 05.22.02 / Ребров Олексій Юрійович. – Харків, 2021. – 423 с.
2. Вибір параметрів шин сільськогосподарських тракторів: монографія / О.Ю. Ребров. – Харків. Видавець: О.А. Мірошніченко, 2021. – 304 с. іл.
3. ДСТУ 4521:2006 Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. Київ, 2007. 8с.
4. Damanauskas V. Influence of Extra Weight and Tire Pressure on Fuel Consumption at Normal Tractor Slippage / V. Damanauskas, A. Janulevicius, G. Pupinis // Journal of Agricultural Science. – 2015. Vol. 7, No. 2. – P. 197–215. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v7n2p55>.
5. Janulevicius A. Tractor ballasting in field work / A. Janulevicius, K. Giedra // Mechanika. – 2008, No. 73. – P. 27–34.
6. Damanauskas V. Influence of adjustable front ballast on tractor fuel consumption at winter wheat stubble harrowing / V. Damanauskas, A. Janulevicius // 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. 26-28.05.2021 Jelgava, LATVIA. DOI: <http://dx.doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF145>.
7. Надикто В. Визначення максимального буксування колісних рушіїв з урахуванням обмеження їх тиску на ґрунт / В. Надикто // Техніка і технології АПК. – 2014. – № 7. -С. 34-38.
8. Надикто В. Т. Проблема баластування колісних тракторів / Надикто В. Т. // Техніка і технології АПК. – 2013. – № 2. – С. 7–9.
9. Потенційні можливості баластування колісного трактора за умовою екофільності шини в залежності від тиску повітря в ній / В. П. Кувачов, В. Б. Мітков, А. М. Аюбов, О. В. Шульга // Науковий вісник ТДАТУ. – 2016. –Вип. 6, т. 3. – С. 26–32.
10. ДСТУ 4428:2005 Техніка сільсько-господарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. Київ, 2006. 8 с.
11. Ребров О.Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України / О.Ю. Ребров // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 27 (1303). – С. 110–116.
12. Ребров О.Ю. Оціночний аналіз дії на ґрунт ходових систем колісних сільськогосподарських тракторів / О.Ю. Ребров, Б.І. Кальченко, М.Є. Якунін, В.А. Макаров, І.Г. Бучко, О.М. Реброва, О.В. Артюшенко, О.М. Леоненко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Автомобіле- і тракторобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2022. – № 1. – С. 36–43.

References (transliterated)

1. Naukove obgruntuvannya pidvyshchennia efektyvnosti kolisnykh rushiiv silskohospodarskykh traktoriv na enerhoiemnykh tekhnolohichnykh operatsiiah obrobittu ґruntu [Scientific substantiation of increasing of wheeled agricultural tractor's propulsors efficiency on energy intensive technological operations of soil tillage. – Manuscript]: dys. ... d-r tekhn. nauk: 05.22.02 / Rebrov Oleksii Yuriiovych. – Kharkiv, 2021. – 423 s.
2. Vybir parametriv shyn silskohospodarskykh traktoriv: monohrafiia [Choice of parameters of agricultural tractors tires: monograph] / O.Yu. Rebrov. – Kharkiv. Vydavets: O.A. Miroshnychenko, 2021. – 304 s. il.
3. DSTU 4521:2006 Tekhnika silskohospodarska mobilna. Normy dii khodovykh system na ґrunt. Kyiv, 2007. 8 s.
4. Damanauskas V. Influence of Extra Weight and Tire Pressure on Fuel Consumption at Normal Tractor Slippage / V. Damanauskas, A. Janulevicius, G. Pupinis // Journal of Agricultural Science. – 2015. Vol. 7, No. 2. – P. 197–215. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v7n2p55>.
5. Janulevicius A. Tractor ballasting in field work / A. Janulevicius, K. Giedra // Mechanika. – 2008, No. 73. – P. 27–34.
6. Damanauskas V. Influence of adjustable front ballast on tractor fuel consumption at winter wheat stubble harrowing / V. Damanauskas, A. Janulevicius // 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. 26-28.05.2021 Jelgava, LATVIA. DOI: <http://dx.doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF145>.
7. Nadykto V. Vyznachennia maksymalnoho buksuvannia kolisnykh rushiiv z urakhuvanniam obmezhenia yikh tysku na hrunt / V. Nadykto // Tekhnika i tekhnolohii APK. – 2014. – № 7. -С. 34-38.

8. Nadykto V. T. Problema balastuvannia kolisnykh traktoriv / Nadykto V. T. // Tekhnika i tekhnolohii APK. – 2013. – № 2. – S. 7–9.
9. Potentsiini mozhyvosti balastuvannia kolisnogo traktora za umovoiu ekofilnosti shyny v zalezhnosti vid tysku povitria v nei / V. P. Kuvachov, V. B. Mitkov, A. M. Aiubov, O. V. Shulha // Naukovyi visnyk TDATU. – 2016. – Vyp. 6, t. 3. – S. 26–32.
10. DSTU 4428:2005 Tekhnika silsko-hospodarska mobilna. Metody vyznachennia dii khodovykh system na grunt. Kyiv, 2006. 8 s.
11. Rebrov O.Yu. Rozpodil dopustymoho tysku na grunt khodovykh system kolisnykh traktoriv za terytoriiu Ukrainy / O.Yu. Rebrov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Ser. Matematychno modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2018. – № 27 (1303). – S. 110–116.
12. Rebrov O.Iu. Otsinochnyi analiz dii na hrunt khodovykh system kolisnykh silskohospodarskykh traktoriv / O.Iu. Rebrov, B.I. Kalchenko, M.Ie. Yakunin, V.A. Makarov, I.H. Buchko, O.M. Rebrova, O.V. Artiushenko, O.M. Leonenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Ser. Avtomobile- i traktorobuduvannia. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2022. – № 1. – S. 36–43.

Надійшла (received) 30.05.2023 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Ребров Олексій Юрійович (Rebrov Oleksii) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>; e-mail: oleksii.rebrov@khp.edu.ua

Малько Максим Миколайович (Maksym Malko) - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0125-2141>; e-mail: maxim.malko@khp.edu.ua

Реброва Анастасія Олексіївна (Rebrova Anastasiia) – студентка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0009-0208>; e-mail: anastasiia.rebrova@cs.khp.edu.ua

Якунін Максим Євгенович (Yakunin Maksym) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4918-6558>; e-mail: yakunin_maksim92@ukr.net