

О.Ю. РЕБРОВ

БАЛАСТУВАННЯ ТА ЗДВОЄННЯ ШИН КОЛІСНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТРАКТОРІВ ЗА УМОВ ВИКОНАННЯ АГРОЕКОЛОГІЧНИХ НОРМ ДІЇ НА ГРУНТ

В статті наведений аналітичний підхід до впровадження баластування та здвоєння шин сільськогосподарських колісних тракторів, який базується на безумовному виконанні агроекологічних норм щодо дії ходових систем на ґрунт. Показана необхідність узгодження показників положення центру ваги трактора, співвідношення площі контакту з ґрунтом передніх та задніх шин, а також їх вантажопідйомності. Доведена необхідність використання рівного внутрішнього тиску в шинах трактора при одинарному та здвоєному застосуванні, що обумовлює необхідність збереження положення центру ваги при баластуванні. Запропонована методика вибору маси баластних ваг для установки в дисках задніх коліс та передню навісну систему трактора, а також система баластних ваг, яка дає змогу забезпечити максимально можливу масу трактора для виконання агроекологічних вимог щодо максимального тиску на ґрунт. Показана перспективність застосування здвоєних шин для зниження максимального тиску трактора на ґрунт, а також доведено високу ефективність баластування трактора на здвоєних шинах. На прикладі показана можливість підвищення частки території України, де можливе функціонування трактора без порушення агроекологічних норм на 20-40% за рахунок застосування здвоєних шин. Також доведена можливість підвищення ефективності трактора до 1,5 раз за рахунок баластування та здвоєння шин. Отримані дані базуються на 20 розрахункових варіантах трактора з різним ступенем баластування та застосування різних схем здвоєння шин.

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

O. REBROV

BALLASTING AND DUAL TIRES USING OF WHEELED AGRICULTURAL TRACTORS UNDER THE CONDITIONS OF FULFILLING AGRO-ECOLOGICAL STANDARDS FOR SOIL INTERACTION

The article presents an analytical approach to the implementation of ballasting and dual tires using of agricultural wheeled tractors, which is based on the unconditional fulfilment of agro-ecological standards of tires soil interaction. The necessity of harmonizing the indicators of the position of the centre of gravity of the tractor, the footprint area of the front and rear tires ratio, as well as their load capacity is shown. The need to use equal flotation in tractor's tires during single and double use has been proven, which determines the need to maintain the position of the centre of gravity during ballasting. The method of selecting the mass of ballast weights for installation in the rear wheel discs and the front linkage system of the tractor, as well as the ballast weight system, which makes it possible to ensure the maximum possible weight of the tractor to meet the agro-ecological requirements regarding the maximum pressure on the soil, is proposed. The perspective of dual tires using to reduce the maximum pressure of the tractor on the soil is shown, and the high efficiency of ballasting the tractor on dual tires is also proven. The example shows the possibility of increasing the part of the territory of Ukraine where it is possible to operate the tractor without violating agro-ecological norms by 20-40% due to the use of dual tires. The possibility of increasing the efficiency of the tractor up to 1.5 times due to ballasting and doubling of tires has also been proven. The obtained data are based on 20 calculation variants of the tractor with different degrees of ballasting and the use of different tire doubling schemes.

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

Вступ.

При функціонуванні колісних сільськогосподарських тракторів в польових умовах ефективність та безпечність їх роботи визначається, насамперед, процесами, що протікають при взаємодії шин з ґрунтом. Бажання підвищити ефективність колісного трактора, яке проявляється в намаганні збільшити продуктивність та зменшити витрату палива, призводить іноді до його надмірного баластування, що може стати вельми негативним фактором переущільнення ґрунтів, їх подальшої деградації та втрати врожайності сільськогосподарських культур. Отже виникає протиріччя між підвищенням ефективності за рахунок збільшення зчпної ваги трактора та збереженням потенціалу ґрунтів і реалізації операцій в агротехнічні

строки, а іноді й самої можливості руху трактора по перезволоженому ґрунту, що досягається при зниженні його ваги або застосуванні систем здвоєння шин. Вихідним фактором, на який необхідно спиратися, при визначенні необхідної маси трактора є збереження потенціалу ґрунтів, запобігання їх деградації та руйнування. Для цього необхідне виконання ряду умов щодо обмеження зміни стану ґрунтів в річному циклі їх обробітку [1], які знайшли своє формальне втілення в Державному стандарті України [2].

З огляду на зазначене протиріччя, актуальним є питання створення системи баластування та здвоєння шин колісних тракторів, яка забезпечує потенційно досяжну ефективність трактора без порушення агроекологічних вимог щодо дії ходових систем на ґрунт.

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

При виконанні польових тягових операцій маса трактора суттєво впливає на показники витрати палива [3-4]. Такий вплив здійснюється за рахунок кінематичних втрат потужності при буксуванні колісного рушія по ґрунту. Підвищення маси має позитивний ефект внаслідок зниження буксування шин, але, разом з цим, збільшується опір коченню при утворенні більш глибокої колії. При досягненні масою трактора відповідних значень втрати потужності на буксування стають меншими за зростаючі втрати потужності на подолання опору коченню. Така маса трактора відповідає максимуму тягового ККД трактора. На баланс втрат потужності впливає не тільки внутрішній тиск в шинах [3], але й положення центру ваги та його зміна внаслідок баластування [5]. Отже, традиційно масу трактора при функціонуванні на відповідному ґрунті та агротехнічному фоні визначають з позиції максимуму тягового ККД, при цьому питання порушення агроекологічних вимог щодо дії ходових систем на ґрунт не розглядається. Питання обмеження ваги трактора і, як наслідок, радіальної навантаги на шини підіймається в роботах [6-8]. Дійсно, враховуючи гранулометричний склад і вологість ґрунту, в ДСТУ [2] визначений максимально допустимий тиск на ґрунт, який обумовлений здатністю ґрунту відновлюватися від накопичених деформацій пресування (стискання) в річному циклі обробітку. З огляду на це, в роботі [6] пропонується обмежувати буксування рушіїв для запобігання надмірному пресуванню ґрунту не тільки в вертикальному, але й в горизонтальному напрямку ґрунтозачепами шини. Проблематика баластування колісних тракторів дійсно повинна спиратися на вимоги ДСТУ [2] при відповідному стані ґрунту, що показано в роботах [7-8]. Але це питання потребує ретельного опрацювання з урахуванням фізико-механічних властивостей шин, впливу внутрішнього тиску в шинах на показники плями контакту, розподілу зчіпної ваги, кінематичної невідповідності в плямах контакту шин з ґрунтом, розподілу потужності по ведучим мостам трактора, особливостей режимів роботи одинарних та здвоєних шин та їх вантажопідйомності, експлуатації шин в режимах роботи, що відповідають індексам швидкості A_2 та A_6 . Частково ці питання викладені в роботах [9-10].

Мета та постановка задачі дослідження.

Метою даної роботи є розробка аналітичного підходу до баластування та здвоєння шин сільськогосподарських колісних тракторів, який базується на безумовному виконанні агроекологічних норм щодо дії ходових систем на ґрунт.

Для досягнення поставленої мети вирішувались завдання узгодження показників положення центру ваги трактора з співвідношенням площі контакту з ґрунтом передніх та задніх шин та їх вантажопідйомності; обґрунтування необхідності збереження положення центру ваги при баластуванні; визначення перспективності застосування здвоєних шин для зниження максимального тиску трактора на ґрунт та підвищення ефективності трактора; ілюстрування запропонованого підходу на прикладі колісного трактора класичної компоновки.

Основний матеріал та результати дослідження.

Допустиму радіальну навантагу на шину можна визначити, скориставшись ДСТУ [11]:

$$G_k \leq \frac{[q_{\max}] \cdot k_{\Sigma} \cdot k_D \cdot F_F}{1,5}, \quad (1)$$

де $[q_{\max}]$ – нормативна величина допустимого тиску на ґрунт; k_{Σ} – коефіцієнт, що враховує умови роботи рушія; k_D – коефіцієнт, що враховує зовнішній діаметр шини; F_F – контурна площа плями контакту шини.

Оцінити можливість баластування трактора можна з використанням залежності:

$$G_0 + G_b \leq \frac{[q_{\max}] \cdot k_{\Sigma} \cdot k_D \cdot 2 \cdot (F_{F1} + F_{F2})}{1,5}, \quad (2)$$

де G_0 – вага трактора без баласту; G_b – вага баласту; F_{F1}, F_{F2} – контурні площі плями контакту передніх та задніх шин.

Розділимо вираз (2) на G_0 :

$$\lambda_b \leq \frac{[q_{\max}] \cdot k_{\Sigma} \cdot k_D \cdot 2 \cdot (F_{F1} + F_{F2})}{1,5 \cdot G_0} - 1, \quad (3)$$

де $\lambda_b = G_b/G_0$ – коефіцієнт баластування трактора у долях його ваги.

Вочевидь, що баластування трактора можливе, якщо $\lambda_b > 0$, а в інших випадках вага трактора є надмірною для експлуатації при даному допустимому тиску $[q_{\max}]$. Найменший тиск на ґрунт буде у випадку, коли $q_{\max 1} = q_{\max 2}$, а на передній ведучий міст припадає частка ваги:

$$m_{1F} = \frac{F_{F1}}{(F_{F1} + F_{F2})}. \quad (4)$$

Враховуючи, що при збільшенні сили тяги на гаку відбувається перерозподіл зчпної ваги між ведучими мостами трактора, доцільно буде конструктивне положення центру ваги збільшити відносно m_{1F} :

$$m_{1k} = m_{1F} + (0,02 \dots 0,04). \quad (5)$$

Також постає питання розподілу баластної ваги за традиційними місцями установки: у задніх колісних дисках та у передньому звисі трактора (рис. 1.а). Раціональним буде такий розподіл баластної ваги, який забезпечить, практично незмінним положення центру ваги m_{1k} після баластування, причому:

$$\lambda_b = \lambda_{b1} + \lambda_{b2} = \frac{G_{\delta 1}}{G_0} + \frac{G_{\delta 2}}{G_0} = \frac{G_{\delta}}{G_0}, \quad (6)$$

де $\lambda_{b1}, \lambda_{b2}$ – коефіцієнти баластування передньою та задньою баластними вагами у долях ваги трактора.

Вага, що припадає на передній та задній мости при баластуванні:

$$G_1 = G_0 \cdot \left(m_{1k} + \lambda_{b1} \cdot \frac{(L + l_{b1})}{L} \right); \quad G_2 = G_0 \cdot \left((1 - m_{1k}) - \lambda_{b1} \cdot \frac{l_{b1}}{L} + \lambda_{b2} \right), \quad (7)$$

де l_{b1}, L – відстань від переднього моста до центру тяжіння передньої баластної ваги (рис. 1.а) та повздовжня база трактора, відповідно.

Після перетворень виразів (7) отримуємо рівняння:

$$\frac{m_{1k} + \lambda_{b1} \cdot \frac{(L + l_{b1})}{L}}{1 + \lambda_{b1} + \lambda_{b2}} = m_{1k}. \quad (8)$$

З (8) знаходимо співвідношення величини баластних ваг:

$$k_{\lambda} = \frac{\lambda_{b1}}{\lambda_{b2}} = \frac{m_{1k}}{1 + \frac{l_{b1}}{L} - m_{1k}}. \quad (9)$$

І отримуємо розподіл коефіцієнту баластування трактора λ_b на його складові λ_{b1} та λ_{b2} :

$$\lambda_{b1} = \frac{k_{\lambda} \cdot \lambda_b}{1 + k_{\lambda}}; \quad \lambda_{b2} = \frac{\lambda_{b1}}{k_{\lambda}}. \quad (10)$$

Максимально можливий коефіцієнт баластування $\lambda_{b\max}$ можна визначити з (3), прийнявши для ґрунто-кліматичних умов України $[q_{\max}] = 180 \dots 190$ кПа, оскільки подальше баластування трактора взагалі не має сенсу з агроекологічних міркувань [2].

Далі постає питання розбивки $\lambda_{b1\max}$ і $\lambda_{b2\max}$ або максимальних значень баластних ваг $G_{b1\max}$ і $G_{b2\max}$ з таким розрахунком, щоб трактор міг найбільш ефективно експлуатуватися в діапазоні ваги $[G_0, \lambda_{b\max} \cdot G_0]$. Тобто, з одного боку, щоб трактор був якомога більше баластований, але не порушував вимоги щодо максимального тиску на ґрунт при його поточному значенні в інтервалі: $[q_{\max}] = q_{\min} \dots 190$ кПа:

$$q_{\min} = \frac{1,5 \cdot G_0}{k_{\Sigma} \cdot k_D \cdot 2 \cdot (F_{F1} + F_{F2})}, \quad (11)$$

де q_{\min} – мінімально можливий максимальний тиск на ґрунт трактора без баласту на одинарних шинах при вазі G_0 .

Перспективним може бути система, побудована на 2-х або 3-х вагах (рис. 1.б). Прикладом системи з 2-х передніх ваг може бути система EasyMass (рис. 1.б).

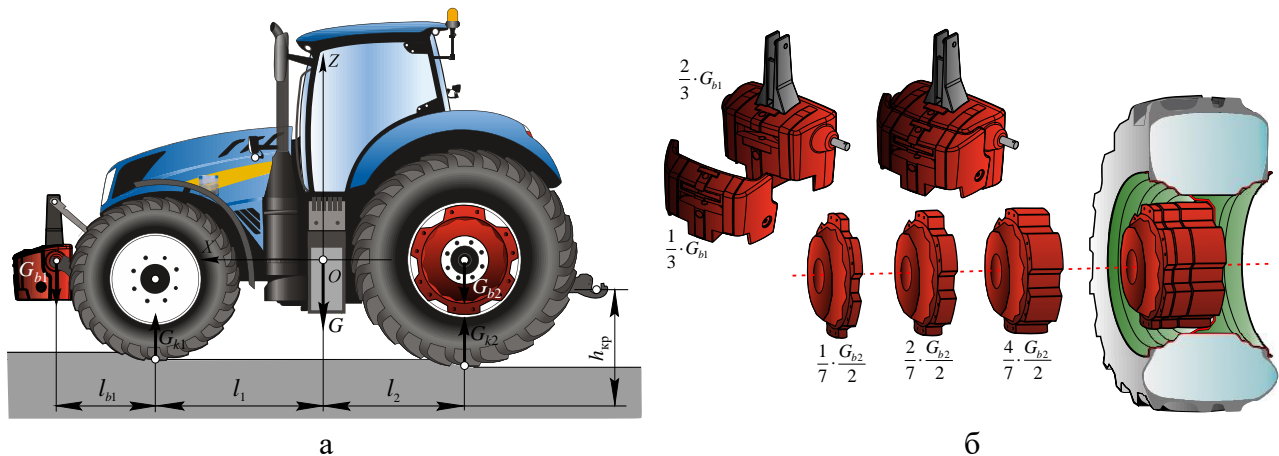


Рис. 1 – Схема баластування колісного трактора:
а – розрахункова схема; б – система передніх та задніх баластних ваг

Враховуючи, що середнє значення максимального тиску на ґрунт сучасних колісних тракторів становить близько 120 кПа, застосування системи 2-х ваг дасть змогу отримати трактор, що має максимальний тиск на ґрунт 120, 140, 160 та 180 кПа, відповідно. При системі, що складається з 3-х ваг, можна отримати трактор з максимальним тиском на ґрунт 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190 кПа. Тобто, система 2-х ваг дає змогу при баластуванні підвищувати максимальний тиск з кроком 20 кПа, а система 3-х ваг – з кроком 10 кПа.

Обладнання трактора баластом вимагає підвищення внутрішнього тиску в шинах, який визначається відповідно до радіальної навантаги на шину G_k :

$$p_{\text{ш}} = p_{\min} + \frac{(p_{\max} - p_{\min})}{(Q_{\max} - Q_{\min})} \cdot (G_k - Q_{\min}), \quad (12)$$

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

Слід відзначити, що максимальний тиск на ґрунт переважно визначається внутрішнім тиском в шині $p_{\text{ш}}$, а не радіальною навантагою G_k , як показано в роботах [9-10]. Але, разом з цим, радіальна навантага G_k вимагає відповідного внутрішнього тиску в шині $p_{\text{ш}}$. Відомо [9], що середній тиск на ґрунт на 15-20 кПа більший за внутрішній тиск. Тому, для реалізації максимального тиску на ґрунт на рівні 120 кПа внутрішній тиск в шинах має бути близьким до p_{\min} і становити 60...80 кПа. Отже, вага трактора без баласту G_0 повинна забезпечуватися

вантажопідйомністю шин при внутрішньому тиску, наближеному до нижньої межі p_{\min} , що дасть змогу баластувати трактор при сприятливих ґрунто-кліматичних умовах та вологості ґрунту при допустимому максимальному тиску впритул до $[q_{\max}] = 180 \dots 190$ кПа і підвищенні внутрішнього тиску в шинах до $p_{\text{ш}} = 120 \dots 140$ кПа.

Для надання можливості використання трактора при допустимому тиску, нижчому за 120 кПа, особливо на весняно-польових роботах, необхідно застосовувати здвоєння шин. Як відмічалось [9-10], застосування штатних шин для здвоєння не гарантує бажаного ефекту. Для здвоєння раціонально застосовувати спеціально розроблені для цього високопрофільні шини з шириною профілю 460-520 мм та посадковим діаметром 42-46 дюймів [9-10]. Але розглянемо випадок здвоєння штатних шин. При цьому, можна досягти успіху в питанні зниження максимального тиску на ґрунт, якщо здвоєні шини експлуатуватимуться за внутрішнього тиску, меншого ніж для трактора без баласту вагою G_0 . Тобто, внутрішній тиск в здвоєних шинах має бути якомога нижчим. Сучасні конструкції шин дають змогу експлуатувати їх при здвоєнні за внутрішнього тиску 40 кПа. Це стало можливим не тільки завдяки інноваціям в технології виготовлення шин, але й тому, що здвоєння розглядається як захід, спрямований, в першу чергу, на зниження максимального тиску на ґрунт, а шини експлуатуються при невеликому значенні крутного моменту (при невеликій тязі трактора). Такий режим функціонування відповідає весняно-польовим роботам на пухких ґрунтах. З іншого боку, застосування здвоєних шин також може розглядатися, як баластування трактора, оскільки збільшується його зчїпна вага за рахунок маси самих шин та систем здвоєння.

При сумісному застосуванні здвоєння та баластування вагами необхідно визначити радіальні навантаги на передні та задні шини:

$$G_{k1} = \frac{G_0 \cdot \left(\frac{l_2}{L}\right) + G_{b1} \cdot \frac{(L+l_{b1})}{L} + 2 \cdot G_{t1} \cdot (dual_1 - 1) - P_{\text{кр}} \frac{h_{\text{кр}}}{L}}{2 \cdot dual_1}; \quad (13)$$

$$G_{k2} = \frac{G_0 \cdot \left(\frac{l_1}{L}\right) - G_{b1} \cdot \frac{l_{b1}}{L} + 2 \cdot G_{t2} \cdot (dual_2 - 1) + 2 \cdot G_{b2} + P_{\text{кр}} \frac{h_{\text{кр}}}{L}}{2 \cdot dual_2},$$

де G_{t1} , G_{t2} – вага передніх та задніх шин (коліс) разом з системою здвоєння; $dual_1$, $dual_2$ – коефіцієнти, що враховують наявність здвоєння шин (1 – для одинарної шини, 2 – для здвоєної).

Для контролю рівня навантаження шин та необхідності коректування внутрішнього тиску в шині введемо коефіцієнт навантаження шини (%):

$$k_{\text{ш}} = \frac{G_k}{[Q]_{\text{пш}} \cdot k_{\text{dual}}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

де $[Q]_{\text{пш}}$ – допустима радіальна навантага на одинарну шину при даному тиску повітря $p_{\text{ш}}$; k_{dual} – коефіцієнт, що враховує зміну допустимої радіальної навантаги на шину при здвоєнні/зтроєнні ($k_{\text{dual}} = 1; 0,88; 0,82$ для одинарних/здвоєних/зтроєних шин, відповідно).

$$[Q]_{\text{пш}} = Q_{\min} + \frac{(Q_{\max} - Q_{\min})}{(p_{\max} - p_{\min})} \cdot (p_{\text{ш}} - p_{\min}). \quad (15)$$

Ступінь баластування трактора на здвоєних шинах не можна визначати за залежністю (3), оскільки, у переважній більшості випадків, здвоєні шини є недовантаженими та для реалізації відповідного максимального тиску на ґрунт в межах допустимого, розрахунковий внутрішній тиск в здвоєних шинах буде менше мінімально допустимого p_{\min} , який становить 40...60 кПа.

Тому, режими роботи шин будемо відслідковувати за коефіцієнтом навантаження $k_{\text{ш}}$, а також коефіцієнтом площі плями контакту:

$$\lambda_f = \frac{F_k}{F_F}, \quad (16)$$

де F_k – розрахункове значення контурної площі плями контакту при відповідному тиску $p_{ш}$ і радіальній навантазі G_k ; F_F – контурна площа плями контакту шини за даними виробника, яка відповідає режиму роботи з індексом швидкості A_6 та навантаженні при p_{max} та Q_{max} .

Проаналізуємо наведену методику на прикладі колісного трактора з наступними даними: вага 9700 кг, потужність двигуна 211 кВт, повздовжня база 2,95 м, різниця індексів довжини окружності кочення задніх та передніх шин $\Delta RCI=4$.

Для даного трактора обираємо шини: передні 600/65R34 151D Michelin, задні 710/70R42 173D Michelin. Обидві шини допускають експлуатацію при мінімальному тиску 60 кПа (0,6 бар) – при одинарному використанні та 40 кПа (0,4 бар) – при здвоєному. Контурна площа плями контакту: $F_{F1} = 2472\text{см}^2$, $F_{F2} = 3914\text{см}^2$.

Отже, згідно (4), однаковий максимальний тиск на ґрунт буде при положенні центру ваги $m_{1F} = 0,387$, а, згідно (5), обираємо конструктивне положення центру ваги трактора $m_{1k} = 0,42$. Ступінь баластування трактора при допустимому максимальному тиску $[q_{max}] = 180$ кПа, коли баластування ще має сенс, згідно (3), $\lambda_b = 0,772$. За прототипом приймаємо $l_{b1} = 1,2$ м та отримуємо, згідно (9), співвідношення величини баластних ваг $k_\lambda = 0,426$ та, згідно (10), визначаємо коефіцієнти баластування трактора передніми та задніми вагами: $\lambda_{b1} = 0,230$, $\lambda_{b2} = 0,541$. Розрахункова максимальна маса передніх та задніх (в колісних дисках) ваг: $M_{b1} = \lambda_{b1} \cdot M = 2235$ кг (приймаємо 2275 кг), $M_{b2} = \lambda_{b2} \cdot M/2 = 2625$ кг. Запровадимо для баластування систему з 3-х ваг. Передні ваги будуть мати масу: $m_{п1} = 325$ кг, $m_{п2} = 650$ кг, $m_{п3} = 1300$ кг, а задні: $m_{з1} = 375$ кг, $m_{з2} = 750$ кг, $m_{з3} = 1500$ кг.

Таким чином, трактор матиме 8 варіантів маси при баластуванні на одинарних шинах. Однак, якщо з агротехнологічних вимог треба знизити максимальний тиск на ґрунт менше за q_{min} , необхідно запровадити здвоєння шин. В рамках цієї роботи пропонується застосувати здвоєння штатних шин, обраних раніше. Розрахунки показників функціонування трактора проводились з урахуванням внутрішнього тиску в шинах, перерозподілу зчіпної ваги при реалізації сили тяги, наявності або відсутності здвоєння, контролю поточної площі плями контакту та навантаження шини, визначення кінематично пов'язаного буксування передніх та задніх шин, вертикального пресування ґрунту та утворення колії, агрегатування знаряддями для відвального (оранка) та безвідвального (культивация) обробітку ґрунту [9-10]. В результаті був отриманий комплекс показників трактора серед яких: чиста продуктивність, витрата палива та сила тяги на оранці та культивачі, максимальний тиск на ґрунт. Ці показники брались до уваги для порівняння ефективності варіантів баластування трактора. Оскільки при виконанні технологічних операцій існують відповідні обмеження, вони в обов'язковому порядку враховувалися. Так, для відвального обробітку ґрунту швидкість повинна бути в межах 1,6-3,0 м/с, а для всіх технологічних операцій буксування рушіїв не повинно перевищувати 15%. Тобто, визначались показники трактора в межах допустимих режимів функціонування. Наступним кроком визначались середні значення показників за всіма допустимими режимами функціонування із сукупності всіх можливих, які формувалися за рахунок зміни швидкісного режиму роботи двигуна (роботі його за зовнішньою швидкісною характеристикою) та варіювання передавальним числом (відношенням) трансмісії в широких межах [9].

Розрахункам та аналізу підлягали 8 варіантів різної маси трактора на одинарних шинах, 8 варіантів на здвоєних передніх та задніх шинах та 4 варіанти на здвоєних тільки задніх шинах. При цьому визначалась середня чиста продуктивність на оранці та культивачі S_0 та S_k , середня витрата палива на оранці та культивачі W_0 та W_k , середня сила тяги на оранці та культивачі $P_{кpo}$, $P_{кpk}$ при відповідній масі трактора M (табл. 1).

Слід відзначити наступні особливості. По-перше, немає фактично ніякого сенсу встановлювати різний внутрішній тиск в шинах переднього та заднього мостів при одинарному

та здвоєному застосуванні ($p_{ш}$, табл. 1). Це пояснюється абсолютно переважаючим впливом внутрішнього тиску в шині на тиск на ґрунт в порівнянні з радіальною навантагою. Тому, важливо розташувати центр ваги трактора відповідно до співвідношення площ плям контакту передніх та задніх шин з урахуванням сили тяги на гаку таким чином, щоб забезпечити рівність максимального тиску на ґрунт передніх та задніх шин при середніх значеннях сили тяги. По-друге, при баластуванні слід зберігати обране положення центру ваги трактора як для одинарних, так і здвоєних шин. Можливий варіант здвоєння тільки задніх шин. Тоді співвідношення рівня баластування передніми та задніми баластними вагами повинно визначатися при рівному тиску в одинарних шинах переднього моста та здвоєних – заднього (M_{b1} , M_{b2} , табл. 1). По-третє, регулювання внутрішнього тиску в шинах при баластуванні повинно бути таким, щоб на одинарних шинах коефіцієнт навантаження шин не перевищував 100%, а на здвоєних – 88% ($k_{п1}$, $k_{п2}$, табл. 1).

Таблиця 1 – Середні розрахункові показники трактора при баластуванні за системою 3-х ваг та застосуванні здвоєних шин

M , кг	S_o , га/год	W_o , кг/га	S_k , га/год	W_k , кг/га	P_{KPO} , кН	P_{KPK} , кН	q_{max} , кПа	$k_{п1}$, %	$k_{п2}$, %	$p_{ш}$, кПа	M_{b1} , кг	M_{b2}^* , кг	Передні ваги	Задні ваги
Передні шини – одинарні, задні шини – одинарні														
9700	1,10	26,28	7,34	5,57	30,40	27,07	115-119	68-94	86-96	60	0	0	-	-
10775	1,21	24,41	8,03	5,18	33,13	29,63	125-128	73-97	88-97	70	325	375	$m_{п1}$	$m_{з1}$
11850	1,32	22,83	8,70	4,86	35,95	32,14	135-139	77-99	90-99	80	650	750	$m_{п2}$	$m_{з2}$
12926	1,43	21,52	9,36	4,60	38,67	34,59	145-149	80-100	92-100	90	975	1125	$m_{п2}+m_{п1}$	$m_{з2}+m_{з1}$
14000	1,53	20,46	9,99	4,37	41,12	36,91	154-159	83-102	94-101	100	1300	1500	$m_{п3}$	$m_{з3}$
15075	1,63	19,53	10,61	4,19	43,53	39,18	164-169	86-104	95-102	110	1625	1875	$m_{п3}+m_{п1}$	$m_{з3}+m_{з1}$
16150	1,70	18,93	11,11	4,07	45,24	40,82	180-186	83-99	92-98	130	1950	2250	$m_{п3}+m_{п2}$	$m_{з3}+m_{з2}$
17225	1,80	18,17	11,71	3,93	47,84	43,08	190-196	86-101	93-99	140	2275	2625	$m_{п3}+m_{п2}+m_{п1}$	$m_{з3}+m_{з2}+m_{з1}$
Передні шини – здвоєні, задні шини – здвоєні														
10923	1,31	23,16	8,59	4,86	35,47	31,28	93-95	53-69	65-73	40	0	0	-	-
11998	1,46	21,32	9,44	4,49	39,36	34,64	94-96	58-76	72-79	40	325	375	$m_{п1}$	$m_{з1}$
13073	1,62	19,74	10,29	4,18	43,30	38,03	95-97	65-83	78-85	40	650	750	$m_{п2}$	$m_{з2}$
14148	1,75	18,59	11,05	3,95	46,52	40,26	100-102	69-87	80-87	45	975	1125	$m_{п2}+m_{п1}$	$m_{з2}+m_{з1}$
15223	1,83	17,81	11,69	3,79	48,53	42,93	108-110	67-85	79-86	55	1300	1500	$m_{п3}$	$m_{з3}$
16298	1,95	16,97	12,41	3,62	51,46	45,61	113-116	73-88	82-88	60	1625	1875	$m_{п3}+m_{п1}$	$m_{з3}+m_{з1}$
17373	2,05	16,35	13,04	3,49	53,77	47,76	122-125	73-87	81-86	70	1950	2250	$m_{п3}+m_{п2}$	$m_{з3}+m_{з2}$
18448	2,12	15,87	13,65	3,39	55,59	49,72	131-134	73-86	80-85	80	2275	2625	$m_{п3}+m_{п2}+m_{п1}$	$m_{з3}+m_{з2}+m_{з1}$
Передні шини – одинарні, задні шини – здвоєні														
13546	1,67	19,52	10,39	4,18	44,46	38,77	113-119	67-94	81-87	60	0	1500	-	$m_{з3}$
14621	1,79	18,51	11,06	3,99	47,44	41,32	122-129	72-97	80-86	70	325	1875	$m_{п1}$	$m_{з3}+m_{з1}$
15696	1,90	17,64	11,72	3,85	50,39	43,83	131-139	76-99	79-85	80	650	2250	$m_{п2}$	$m_{з3}+m_{з2}$
16771	2,02	16,88	12,37	3,67	53,22	46,26	140-149	79-100	79-84	90	975	2625	$m_{п2}+m_{п1}$	$m_{з3}+m_{з2}+m_{з1}$

* – вага заднього баласту M_{b2} на один борт.

Для кількісного порівняння трактора, відповідно до даних табл. 1, визначались відносні (нормовані) показники ефективності за середніми значеннями чистої продуктивності, погектарної витрати палива та сили тяги:

$$K_i^+ = \frac{P_i^+}{P_{i_{max}}^+}; \quad K_i^- = \frac{P_{i_{min}}^-}{P_i^-}, \quad (17)$$

де P_i^+ , $P_{i_{max}}^+$ – показники продуктивності та сили тяги та їх максимальні значення з табл. 1; P_i^- , $P_{i_{min}}^-$ – показники витрати палива та їх мінімальні значення з табл. 1.

Після цього визначався коефіцієнт ефективності K_E як середнє значення відносних показників, визначених за співвідношеннями (17).

За даними максимального тиску на ґрунт (q_{max} , табл. 1) визначалась ймовірність виконання трактором такої маси агроекологічних вимог на території України [12], згідно методики,

наведеної в роботах [9-10]. Результати розрахунків та схеми варіантів баластування трактора наведено на рис. 2.

Отримані дані свідчать, що підвищення ефективності трактора за рахунок баластування неодмінно призводить до погіршення екологічності його рушія. Тому, обґрунтування поточного ступеня баластування трактора необхідно здійснювати, в першу чергу, виходячи з наявного стану ґрунту, його гранулометричного складу, рівня зволоження і, нарешті, допустимого максимального тиску на ґрунт $[q_{max}]$. Застосування здвоєння шин – це захід спрямований на покращення екологічності рушія, який може суттєво (на 20-40%, рис. 2, б) збільшити площу території України, де такий трактор може експлуатуватися без порушення агроекологічних вимог. При однаковій масі трактор на здвоєних шинах завжди буде ефективніше на 5-11%. За рахунок баластування можна підвищити ефективність трактора в 1,5 рази (з 0,6 до 0,86), але частка території України, де він може експлуатуватися при цьому зменшується з 0,4 до 0,035 (рис. 2, б). Проміжне положення займає конструкція зі здвоєними тільки задніми шинами. При однаковій масі така комплектація дає змогу підвищити ефективність практично до трактора з усіма здвоєними шинами, а частка території України, де він може експлуатуватися без порушення агроекологічних норм зростає на 0,15-0,25.

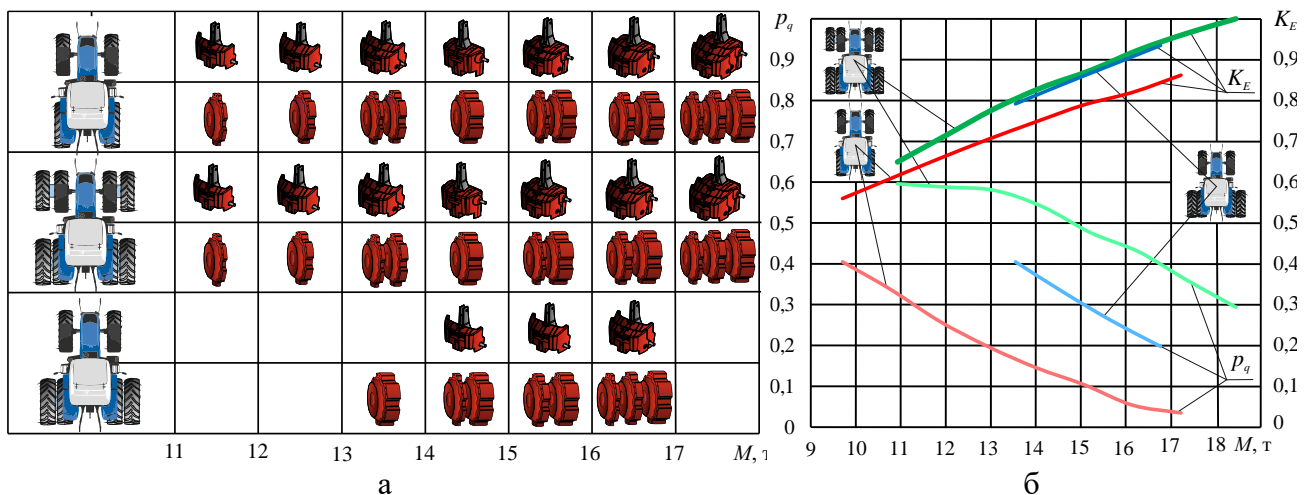


Рис. 2 – Баластування трактора при різних колісних схемах:

а – схеми варіантів баластування; б – показники ефективності та екологічності рушія

Найкраща екологічність рушія у розглянутого трактора досягається на здвоєних шинах при внутрішньому тиску в усіх шинах 40 кПа (0,4 бар). Причому, якщо при такому мінімально допустимому внутрішньому тиску p_{min} шина має запас вантажопідйомності, то його необхідно використовувати, оскільки максимальний тиск на ґрунт при цьому практично не зростає, а ефективність може підвищитись в 1,2 рази (з 0,65 до 0,78, рис. 2, б). Також слід відзначити, що при однаковому тиску в шинах передніх та задніх коліс і коректному положенні центру ваги при баластуванні максимальний тиск на ґрунт змінюється незначно в межах 5-6 кПа (табл. 1) при експлуатації трактора на допустимих режимах роботи на тягових технологічних операціях. Це пояснюється тим, що завдяки розташуванню центру ваги трактора в положенні, яке описано вище, при середній силі тяги на гаку досягається рівність максимального тиску на ґрунт передніх та задніх шин: $q_{max1} = q_{max2}$. Тому вплив перерозподілу зчпної ваги зі зростанням сили тяги на гаку нівелюється. Крім того, площа плями контакту шин з ґрунтом також не залишається постійною зі зміною радіальної навантаги, а слідує за нею. Саме за рахунок цього, зміна радіальної навантаги на шину в межах експлуатаційних режимів роботи при постійному внутрішньому тиску мало впливає на величину максимального тиску на ґрунт. Це також сприяє несуттєвій зміні максимального тиску на ґрунт шин ведучих мостів, а також їх різниці. Це можна яскраво проілюструвати на прикладі трактора на здвоєних передніх та задніх шинах за

внутрішнього тиску 40 кПа. При масі 10923...13073 кг (різниця 2150 кг) максимальний тиск на ґрунт залишається фактично постійним і становить 95...97 кПа (табл. 1).

Таким чином, обґрунтований вибір величини баластування, сумісно із застосуванням вискоефективних шин та їх здвоєння, дає змогу при використанні системи дискретних баластних ваг для збереження положення центру ваги досягти суттєвого покращення як ефективності, так і екологічності рушія трактора.

Висновки.

Баластування та здвоєння шин сільськогосподарських колісних тракторів має базуватися на виконанні агроекологічних норм щодо дії ходових систем на ґрунт. При цьому необхідне узгодження показників положення центру ваги трактора, співвідношення площі контакту з ґрунтом передніх та задніх шин, а також їх вантажопідйомності. Для отримання найкращих показників тиску на ґрунт необхідний однаковий внутрішній тиск в шинах трактора при одинарному та здвоєному застосуванні, що обумовлює необхідність збереження положення центру ваги при баластуванні. Наведена методика вибору маси баластних ваг для установки в дисках задніх коліс та на передню навісну систему трактора, а також система баластних ваг, яка дає змогу забезпечити максимально можливу масу трактора для виконання агроекологічних вимог щодо максимального тиску на ґрунт. Показана перспективність застосування здвоєних шин для зниження максимального тиску трактора на ґрунт, а також доведено високу ефективність баластування трактора на здвоєних шинах. На прикладі показана можливість підвищення частки території України, де можливе функціонування трактора без порушення агроекологічних норм на 20-40% за рахунок застосування здвоєних шин. Також доведена можливість підвищення ефективності трактора до 1,5 раз за рахунок баластування та здвоєння шин.

Список літератури:

1. Медведєв В. В. Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-тракторних агрегатів / В. В. Медведєв // Вісник аграрної науки. – 2012. – № 10. – С. 39–45.
2. ДСТУ 4521:2006 Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. Київ, 2007. 8 с.
3. 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>.
4. Janulevicius A. Tractor ballasting in field work / A. Janulevicius, K. Giedra // Mechanika. – 2008, No. 73. – P. 27–34.
5. 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>.
6. 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.
7. Надикто В. Т. Проблема баластування колісних тракторів / Надикто В. Т. // Техніка і технології АПК. – 2013. – № 2. – С. 7–9.
8. Потенційні можливості баластування колісного трактора за умовою екофільності шини в залежності від тиску повітря в неї / В. П. Кувачов, В. Б. Мітков, А. М. Аюбов, О. В. Шульга // Науковий вісник ТДАТУ. – 2016. – Вип. 6, т. 3. – С. 26–32.
9. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рушіїв сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях обробітку ґрунту: дис. ... д-р техн. наук: 05.22.02 / Ребров Олексій Юрійович. – Харків, 2021. – 423 с.
10. Вибір параметрів шин сільськогосподарських тракторів: монографія / О.Ю. Ребров. – Харків. Видавець: О.А. Мірошніченко, 2021. – 304 с. іл.
11. ДСТУ 4428:2005 Техніка сільсько-господарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. Київ, 2006. 8 с.
12. 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.

References (transliterated):

1. Medvediev V. V. Ekolohizatsiia v konstruiuvanni ta ekspluatatsii zemlerobskykh mashynno-traktornykh ahrehativ / V. V. Medvediev // Visnyk ahrarnoi nauky. – 2012. – № 10. – S. 39–45.
2. DSTU 4521:2006 Tekhnika silskohospodarska mobilna. Normy dii khodovykh system na grunt. Kyiv, 2007. 8 s.
3. 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>.
4. Janulevicius A. Tractor ballasting in field work / A. Janulevicius, K. Giedra // Mechanika. – 2008, No. 73. – P. 27–34.
5. 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>.
6. Nadykto V. Vyznachennia maksimalnogo buksuvannia kolisnykh rushiiv z urakhuvanniam obmezhenia yikh tysku na hrunt / V. Nadykto // Tekhnika i tekhnolohii APK. – 2014. – № 7. – S. 34–38.
7. Nadykto V. T. Problema balastuvannia kolisnykh traktoriv / Nadykto V. T. // Tekhnika i tekhnolohii APK. – 2013. – № 2. – S. 7–9.
8. Potentsiini mozhlyvosti 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.
9. Naukove obgruntuvannia pidvyshchennia efektyvnosti kolisnykh rushiiv silskohospodarskykh traktoriv na enerhoiemnykh tekhnolohichnykh operatsiiakh obrobitku gruntu [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 Yuriiovich. – Kharkiv, 2021. – 423 s.
10. 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.
11. DSTU 4428:2005 Tekhnika silsko-hospodarska mobilna. Metody vyznachennia dii khodovykh system na grunt. Kyiv, 2006. 8 s.
12. Rebrov O.Yu. Rozpodil dopustymoho tysku na grunt khodovykh system kolisnykh traktoriv za terytoriiu Ukrainy / O.Yu. Rebrov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Ser. Matematychni modeliuвання v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2018. – № 27 (1303). – S. 110–116.

Надійшла (received) 10.12.2022 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Ребров Олександр 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: alexrebrov0108@gmail.com