

ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО ТИСКУ НА ҐРУНТ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ШИН ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ БАЛАСТУВАННЯ ТРАКТОРА

Ребров О. Ю.¹,

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. Наведено теоретичний аналіз рівня максимального тиску на ґрунт тракторних сільськогосподарських шин при різних способах баластування трактора. Аналіз враховує зміну жорсткості шини, радіального прогину, вантажопідйомності і площі плями контакту з ґрунтом при підвищенні зчпної ваги трактора за рахунок установки баластних вантажів і наповнення шин баластною рідиною.

Ключові слова: максимальний тиск на ґрунт, баластування трактора, жорсткість шини, радіальна навантага на шину, тиск повітря в шині.

Вступ

Основними показниками, що мають безпосередній вплив на ефективність колісних сільськогосподарських тракторів на тягових технологіях, є потужність двигуна та зчпна вага. Відношення цих показників визначає енергонасиченість трактора. За показником енергонасиченості або питомої ваги рекомендують обирати ступінь баластування трактора [1]. Для тракторів класичної компоновки з автоматичним підключенням переднього мосту (MFWD – mechanical front wheel drive) рекомендується питома вага в інтервалі 120–145 lb/hr (120–145 фунтів на британську кінську силу), що відповідає енергонасиченості 11,6–14,0 кВт/т, а для тракторів з колесами однакового діаметра (4WD – four wheel drive) 85–125 lb/hr (85–125 фунтів на британську кінську силу), що відповідає енергонасиченості 13,4–19,7 кВт/т.

Згідно світових тенденцій [2] сучасні колісні трактори мають енергонасиченість 12,3–33,8 кВт/т. При енергонасиченості понад 20 кВт/т вся потужність двигуна не може бути реалізована в тяговому технологічному процесі при допустимому буксуванні трактора. Тому такі трактори мають суттєвий запас потужності, яка може бути використана на привод сільськогосподарських знарядь або в тяговому режимі при баластуванні. Частка тракторів, які мають енергонасиченість понад 20 кВт/т, складає для синхронізованих трансмісій – 60 %, PowerShift – 25 %, безступінчастих трансмісій – 40 %.

Для енергоємних тягових технологій необхідне суттєве баластування таких енергонасичених тракторів, що неодмінно впливатиме на погіршення екологічності й

супроводжуватиметься підвищенням максимального тиску на ґрунт. Оскільки норми дії ходових систем мобільної сільськогосподарської техніки на ґрунт обмежують максимальний тиск колісних тракторів на ґрунт, виникає протиріччя між високою тяговою ефективністю і шкідливим впливом на навколишнє середовище. Високий тиск тракторних шин на ґрунт сприяє його переущільненню, ерозії, деградації, а також зростанню енергоємності обробітку та зниженню врожайності культур.

З огляду на все вищезазначене, вирішення протиріччя між високою тяговою ефективністю і переущільненням ґрунту є актуальною задачею. Дана робота присвячена саме аналізу максимального тиску на ґрунт тракторних шин при двох способах підвищення зчпної ваги: установкою баластних вантажів і наповненням шин баластною рідиною.

Аналіз публікацій

У фундаментальних наукових роботах [3–8] розглядаються задачі тягової ефективності та дії тракторних шин на ґрунт. Експлуатація тракторів на сільськогосподарських угіддях у багатьох випадках супроводжується переущільненням ґрунту [4], що може призвести до його деградації та зниження врожайності сільськогосподарських культур. Руйнівний вплив ходових систем колісних тракторів на ґрунт можна знизити у разі обґрунтованого вибору маси трактора, параметрів ходової системи і рівня баластування [5]. Оскільки колісний рушій здійснює взаємозв'язок трактора із зовнішнім середовищем [6] та реалізує потужність двигуна в тяговому режимі, постає ключове питання щодо протиріччя

між тяговою ефективністю та рівнем шкідливого впливу на ґрунт [7].

Це протиріччя може бути повною мірою вивчене тільки за рахунок розгляду процесів взаємодії тракторної шини з ґрунтом, що виявляється в аналізі колієутворення, формування опору руху, буксування, реалізації тягового зусилля, пресування та зрушення ґрунту. Вищезазначені процеси добре відомі й описані в теорії трактора [8].

Показники взаємодії колісного трактора з ґрунтом визначаються масою трактора, рівнем його баластування, тиском повітря в шинах, величиною буксування та мають безпосередній вплив на паливну економічність агрегата в технологічному процесі обробітку ґрунту [9]. Дослідження в роботі [10] показали, що шкідливий вплив на ґрунт має підвищене буксування тракторних шин, яке можна суттєво знизити застосуванням баластування.

Однак найбільш руйнівний вплив має надто високий рівень максимального тиску на ґрунт. Так, в роботі [11] автор доводить суттєву нерівномірність розподілу тиску у плямі контакту шини з ґрунтом та її залежність від показників шини. Під час виконання тягових операцій тракторна шина працює з великим, постійно діючим крутним моментом, що також впливає на показники розподілу тиску в плямі контакту [12]. В роботі [13] показано вплив швидкості руху, внутрішнього тиску і радіальної навантаги на опір руху тракторної шини.

Також слід виділити роботи [14–15], які доводять, що оцінку впливу на ґрунт ходових систем колісних тракторів необхідно проводити згідно із встановленим розподілом за територією України допустимого тиску на ґрунт колісних тракторів відповідно до вимог стандарту. Такий аналіз враховує особливості ґрунто-кліматичних умов та фактичних середньо-багаторічних параметрів вмісту вологи в ґрунті в середньо-багаторічні терміни проведення робіт під час підготовки ґрунту під ранні ярові культури навесні та під озиму пшеницю в літньо-осінній період. В якості критерію екологічності шини в роботі [16] запропонована ймовірнісна оцінка відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України.

Загалом у технічній літературі не приділено достатньої уваги питанню баластування шин рідиною, а вся інформація з цього приводу обмежується описом процесу наповнення шини водою. Відсутня також інформація щодо порівняння способів підвищення зчіпної

ваги трактора установкою баластних вантажів і наповненням шин баластною рідиною за показником максимального тиску на ґрунт.

Таким чином, теоретичний аналіз рівня максимального тиску на ґрунт колісних сільськогосподарських тракторів при різних способах баластування є актуальною задачею, вирішення якої дасть змогу поліпшити екологічність колісних рушіїв та сприятиме підвищенню врожайності сільськогосподарських культур. Тому проведений критичний аналіз літературних джерел інформації [3–16] дозволив сформулювати мету і основні завдання дослідження в рамках даної роботи.

Мета і постановка задачі

Метою дослідження є порівняльний аналіз максимального тиску шини на ґрунт при двох способах підвищення зчіпної ваги трактора: установкою баластних вантажів і наповненням шин баластною рідиною.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- виявити чинники і фактори, що впливають на рівень максимального тиску на ґрунт тракторної шини;
- оцінити вплив заповнення шини баластною рідиною на її жорсткість, вантажопідйомність і площу плями контакту з опорною поверхнею;
- встановити переваги і недоліки установок баластних вантажів і наповнення шин баластною рідиною, у тому числі й за показниками максимального тиску на ґрунт;
- обґрунтувати раціональні режими навантаження тракторних шин при різних способах баластування трактора.

Максимальний тиск на ґрунт

Для з'ясування факторів, що впливають на рівень максимального тиску на ґрунт тракторної шини, розглянемо розрахункову схему порожньої та заповненої баластною рідиною шини (рис. 1).

Введемо ряд допущень і спрощень, які у значній мірі не впливатимуть на загальний результат:

- пружні властивості шини представимо у вигляді паралельно-послідовного з'єднання пружних елементів-складових: C_k – жорсткості шини, яка зумовлена деформацією каркасу; C_b – жорсткості шини, яка зумовлена стискуванням повітря; $C_{шп}$ – жорсткості шини, яка зумовлена деформацією протектора;
- маса баластної рідини m_b не навантажує каркас шини (не деформує плечову область і

боковини) радіальною навантагою, а тільки стискає зовнішні шари шини із протектором; – наявність баластної рідини не впливає на форму і розміри плями контакту шини з опорною поверхнею.

Розгляд властивостей шини доцільно розпочати з роботи по її статичному деформуванню [16]:

$$A_{\text{ш}} = A_{\text{к}} + A_{\text{в}} + A_{\text{п}}, \quad (1)$$

де $A_{\text{к}}$, $A_{\text{в}}$, $A_{\text{п}}$ – робота деформації каркасу, стиснення повітря, деформації протектора, відповідно.

Робота деформації каркасу, кДж:

$$A_{\text{к}} = \frac{p_0 \cdot f_{\text{к}}^2}{2 \cdot c_2} = p_0 \cdot \Delta V, \quad (2)$$

де p_0 – постійний для шини коефіцієнт, що характеризує жорсткість каркасу, кПа; c_2 – постійний коефіцієнт, 1/м; $f_{\text{к}}$ – частина радіального прогину, зумовлена деформацією каркасу і стисненням повітря при зміні внутрішнього об'єму шини, м; ΔV – зміна об'єму внутрішньої порожнини шини при деформуванні, м³.

$$f_{\text{к}} = c_2 \cdot \frac{G_{\text{к}}}{p_{\text{ш}} + p_0}, \quad (3)$$

де $G_{\text{к}}$ – радіальна навантага на шину, кН; $p_{\text{ш}}$ – внутрішній тиск повітря в шині, кПа.

$$\Delta V = \frac{f_{\text{к}}^2}{2 \cdot c_2}. \quad (4)$$

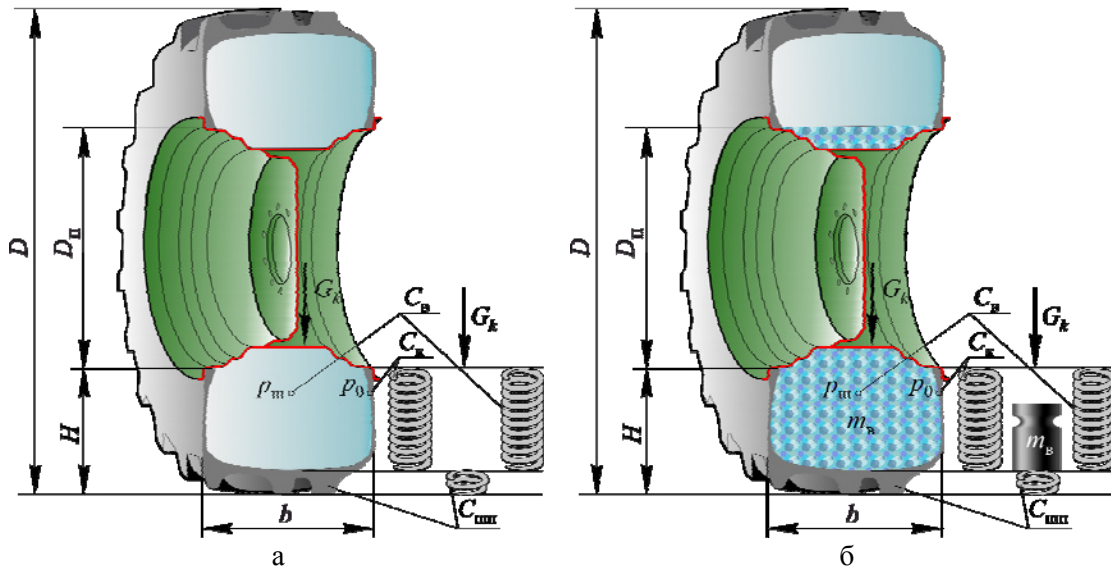


Рис. 1. Розрахункова схема тракторної шини: а – порожня шина; б – заповнена рідиною шина

Робота стиснення повітря, кДж:

$$A_{\text{в}} = \frac{p_{\text{ш}} \cdot f_{\text{к}}^2}{2 \cdot c_2} = p_{\text{ш}} \cdot \Delta V. \quad (5)$$

Робота деформації протектора, кДж:

$$A_{\text{п}} = \frac{f_{\text{п}}^2 \cdot (3 \cdot f_{\text{к}} + 2 \cdot f_{\text{п}})}{6 \cdot c_1}, \quad (6)$$

де c_1 – постійний коефіцієнт, м²/кН; $f_{\text{п}}$ – частина радіального прогину, яка зумовлена деформацією протектора, м:

$$f_{\text{п}} = c_1 \cdot \frac{G_{\text{к}}}{f_{\text{ш}}}, \quad (7)$$

де $f_{\text{ш}}$ – радіальний прогин шини, м:

$$f_{\text{ш}} = f_{\text{п}} + f_{\text{к}} = c_1 \cdot \frac{G_{\text{к}}}{f_{\text{ш}}} + c_2 \cdot \frac{G_{\text{к}}}{p_{\text{ш}} + p_0}. \quad (8)$$

Рішенням рівняння (8) є універсальна характеристика шини [8, 17]:

$$G_{\text{к}} = \frac{f_{\text{ш}}^2}{c_1 + c_2 \cdot \frac{f_{\text{ш}}}{p_{\text{ш}} + p_0}}. \quad (9)$$

В результаті перетворень (9) отримаємо:

$$f_{\text{ш}}^2 - \frac{G_k \cdot c_2}{p_{\text{ш}} + p_0} \cdot f_{\text{ш}} - c_1 \cdot G_k = 0. \quad (10)$$

Після відкидання зайвого кореня рішення рівняння універсальної характеристики (10) відносно радіальної деформації $f_{\text{ш}}$ отримаємо у вигляді залежності від навантаги:

$$f_{\text{ш}} = \frac{c_2 \cdot G_k}{2 \cdot (p_{\text{ш}} + p_0)} + \dots \dots + \sqrt{\left(\frac{c_2 \cdot G_k}{2 \cdot (p_{\text{ш}} + p_0)}\right)^2 + c_1 \cdot G_k}. \quad (11)$$

Якщо взяти похідну виразу (1) з урахуванням (2)–(6) за відповідною деформацією, отримаємо величину радіальної навантаги на шину:

$$G_k = \frac{(p_0 + p_{\text{ш}})}{c_2} \cdot f_k + \frac{f_{\text{п}} + f_{\text{к}}}{c_1} \cdot f_{\text{п}}. \quad (12)$$

Якщо взяти похідну виразу (12) за відповідною деформацією, отримаємо величину радіальної жорсткості каркасу і протектора:

$$C_{\text{шк}} = \frac{(p_0 + p_{\text{ш}})}{c_2} = \frac{p_0}{c_2} + \frac{p_{\text{ш}}}{c_2} = C_{\text{к}} + C_{\text{в}}, \quad (13)$$

де $C_{\text{к}}$ – жорсткість шини, яка зумовлена деформацією каркасу; $C_{\text{в}}$ – жорсткість шини, яка зумовлена стисканням повітря.

$$C_{\text{шш}} = \frac{2 \cdot f_{\text{п}} + f_{\text{к}}}{c_1}. \quad (14)$$

Таким чином, загальна жорсткість шини визначається як для послідовного з'єднання пружних елементів: протектора і каркасу з повітрям (рис. 1):

$$C_{\text{ш}} = \frac{C_{\text{шк}} \cdot C_{\text{шш}}}{C_{\text{шк}} + C_{\text{шш}}}. \quad (15)$$

Проаналізуємо вплив зміни внутрішнього об'єму шини на її жорсткість. Для цього при розрахунку робочих характеристик пневматичного пружного елемента скористаємось рівнянням політропи для опису зміни стану

робочого тіла:

$$p \cdot V^n = \text{const}, \quad (16)$$

де n – показник політропи.

За динамічного навантаження пневматичних шин, що відповідає режимам коливань підвіски, швидкість зміни об'єму газу є великою. Внаслідок низької теплопровідності гумово-кордної оболонки, теплообмін з оточуючим середовищем ускладнений, тепломісткість газу можна вважати постійною, тобто для газу має місце адіабатичний процес. Тому показник політропи n може бути взято рівним 1,4. Отже, зміну тиску в шині опишемо коефіцієнтом підвищення тиску:

$$k_{\text{ш}} = \frac{p_{\text{шд}}}{p_{\text{ш0}}} = \left(\frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{ш}} - \Delta V}\right)^n, \quad (17)$$

де $p_{\text{ш0}}$ – внутрішній тиск в недеформованій шині, кПа; $p_{\text{шд}}$ – внутрішній тиск в деформованій шині, кПа; $V_{\text{ш}}$ – об'єм внутрішньої порожнини недеформованої шини, м³.

Якщо шина наповнена водою або незамерзаючим розчином, то коефіцієнт підвищення тиску дорівнює:

$$k_{\text{шв}} = \left(\frac{V_{\text{ш}} - V_{\text{в}}}{V_{\text{ш}} - V_{\text{в}} - \Delta V}\right)^n, \quad (18)$$

де $V_{\text{в}}$ – об'єм води або незамерзаючого розчину для баластування, наведений в технічних даних на шину, м³.

Максимальне значення об'єму $V_{\text{в}}$ баластної рідини для одинарної шини становить 75 % від об'єму внутрішньої порожнини. Для зведеної шини ця величина дорівнює 40 %. В окремих випадках, якщо іншими способами не вдається отримати необхідний розподіл маси трактора між ведучими мостами, допускається збільшити $V_{\text{в}}$ для зведеної шини до 50 %. При використанні розчину хлориду кальцію (CaCl_2) для експлуатації за температури до -30 °С рекомендується концентрація 400 г/л. При цьому об'єм води становитиме 0,85 $V_{\text{в}}$, решта – хлорид кальцію. Для такої концентрації маса розчину для баластування:

$$m_{\text{р}} = 0,85 \cdot V_{\text{в}} \cdot (\rho_{\text{в}} + \rho_{\text{CaCl}_2}), \quad (19)$$

де $\rho_{\text{в}}$ – щільність води, кг/л; ρ_{CaCl_2} – концентрація хлориду кальцію (0,4 кг/л).

Наповнення шини водою спричинить підвищення складової жорсткості шини, яка відповідає стисканню повітря, за рахунок меншого об'єму повітря, що стискається, внаслідок чого спостерігається підвищення внутрішнього тиску:

$$C_b = \frac{P_{ш}}{c_2} \cdot k_{шв}. \quad (20)$$

Підвищення жорсткості більш інтенсивно проявляється за низького внутрішнього тиску повітря в шині [1].

Для аналізу максимального тиску на ґрунт, розглянемо шину без води (порожню) і шину максимально заповнену на 75 % від об'єму внутрішньої порожнини. Введемо коефіцієнт, який у відсотках характеризує навантагу на шину відносно допустимого значення:

$$k_n = \frac{G_k}{Q_d} \cdot 100\%, \quad (21)$$

де Q_d – допустима навантага на шину при даному тиску.

Аналіз будемо проводити на прикладі шини 800/70 R38 (173 A8) Michelin, яка за своїми техніко-експлуатаційними показниками є однією з найкращих.

Жорсткість шини і її складові змінюються залежно від радіальної навантаги, внутрішнього тиску повітря, наявності і об'єму баластної рідини. В діапазоні експлуатаційних навантаг Е, де коефіцієнт навантаги $k_n = 85$ –100%, жорсткість шини та її складові, головним чином, залежать від внутрішнього тиску повітря в шині (рис. 2).

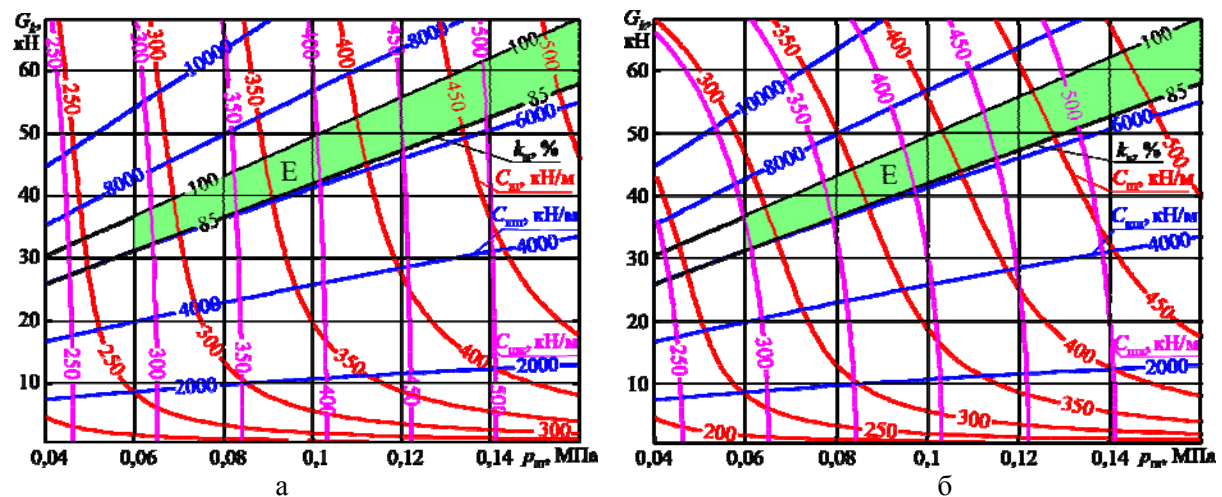


Рис. 2. Радіальна жорсткість та її складові для тракторної шини 800/70 R38 (173 A8) залежно від тиску повітря $p_{ш}$ і радіальної навантаги G_k : а – порожня шина; б – шина, заповнена рідиною на 75 %

Жорсткість шини у разі заповнення на 75 % об'єму в діапазоні експлуатаційних навантаг Е дещо підвищується відносно жорсткості порожньої шини (рис. 3, а), а для шини, заповненої на 40 %, що рекомендується для здвоєних шин, в діапазоні експлуатаційних навантаг Е жорсткість практично не змінюється (рис. 3, б). Тому при розрахунку максимального тиску на ґрунт можна вважати, що площа плями контакту з опорною поверхнею у шини наповненої на 40 % внутрішнього об'єму практично не змінюється, у порівнянні з порожньою шиною внаслідок незначної зміни радіальної жорсткості. Максимальний тиск на ґрунт визначався згідно стандарту [18], з урахуванням того, що маса баластної рідини не створює радіальну навантагу на шину, хоча, безумовно, дещо дефо-

рмує каркас. Маса баластної води становить 15–30 % від допустимої радіальної навантаги (при $k_n = 100$ %), а маса розчину хлориду кальцію – 18–35 %, при заповненні шини рідким баластом на 75 %. При баластуванні шини на 40 % від об'єму маса баластної води становить 9–21 % від допустимої радіальної навантаги (при $k_n = 88$ % для здвоєних шин), а маса розчину хлориду кальцію – 11–25 %. Оскільки маса баластних вантажів може суттєво підвищувати зчипну вагу трактора і обмежується тільки вантажопідйомністю шин, то будемо порівнювати баластування рідиною і баластними вантажами на величину, що дорівнює вазі баластної рідини. Величина максимального тиску на ґрунт порожніх та заповнених баластною рідиною на 75 % і 40 % шин наведена на рис. 4, 5 відповідно.

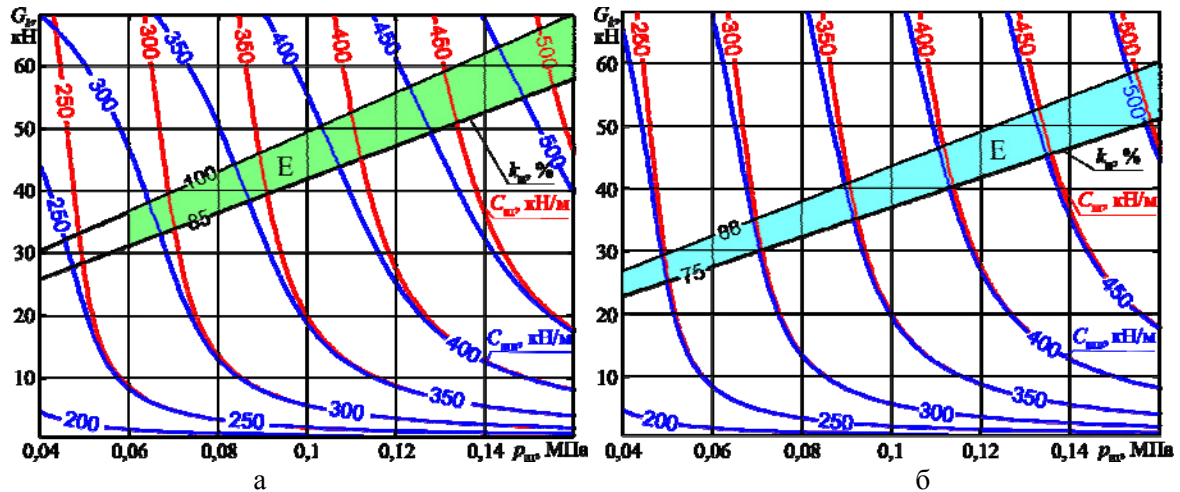


Рис. 3. Порівняння радіальної жорсткості тракторної шини 800/70 R38 (173 A8) при її заповненні на 75 % і 40 % рідиною залежно від тиску повітря $p_{ш}$ і радіальної навантаги G_k : а – порожня і заповнена на 75 % рідиною шина; б – порожня і заповнена на 40 % рідиною шина

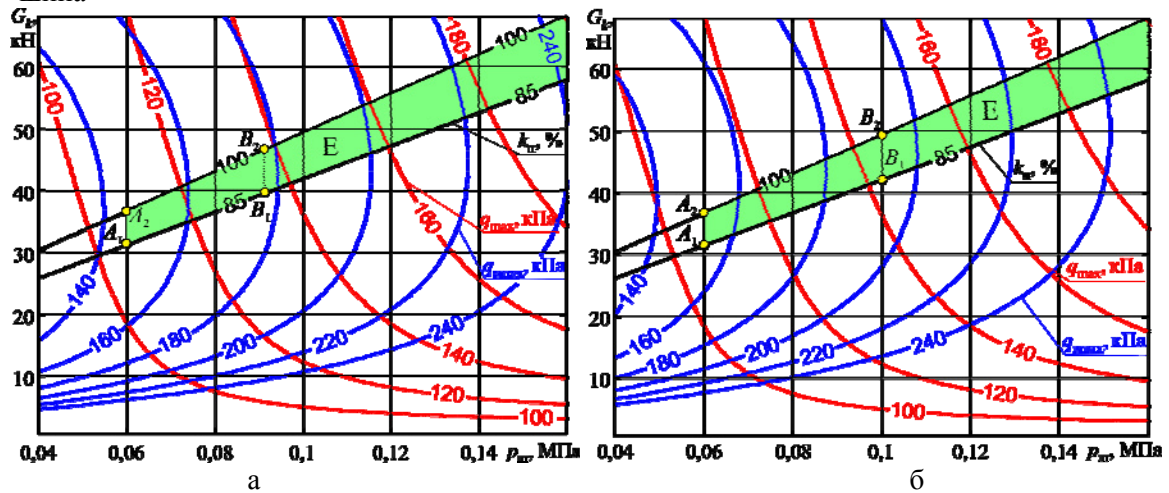


Рис. 4. Порівняння максимального тиску на ґрунт одинарної шини 800/70 R38 (173 A8) залежно від тиску повітря $p_{ш}$ і радіальної навантаги G_k : а – максимальний тиск на ґрунт q_{max} порожньої і q_{vmax} наповненої на 75 % водою шини; б – максимальний тиск на ґрунт q_{max} порожньої і q_{vmax} наповненої на 75 % розчином $CaCl_2$ шини

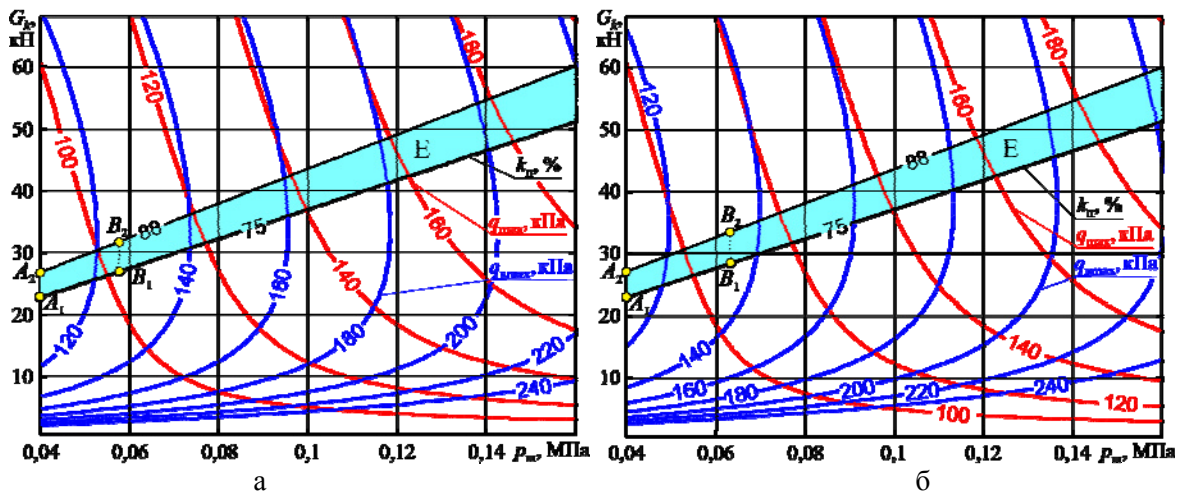


Рис. 5. Порівняння максимального тиску на ґрунт зведеної шини 800/70 R38 (173 A8) залежно від тиску повітря $p_{ш}$ і радіальної навантаги G_k : а – максимальний тиск на ґрунт q_{max} порожньої і q_{vmax} наповненої на 40 % водою шини; б – максимальний тиск на ґрунт q_{max} порожньої і q_{vmax} наповненої на 40 % розчином $CaCl_2$ шини

Оди́нарні шини (рис. 4) за технічними даними більшості виробників мають мінімально допустимий внутрішній тиск повітря 0,6–0,8 бар (0,06–0,08 МПа), а здвоєні шини (рис. 5) можна експлуатувати за меншого тиску 0,4–0,6 бар (0,04–0,06 МПа). Максимально допустимі навантаги для оди́нарної шини досягаються при $k_n = 100\%$, а для здвоєної при $k_n = 88\%$. Тому діапазон експлуатаційних навантаг **Е** оди́нарної та здвоєної шини різняться, як за мінімально допустимим внутрішнім тиском, так і за максимально допустимою радіальною навантагою.

Обговорення результатів

За умов баластування шини рідиною зменшується об'єм повітря, що стискається при радіальній деформації, тому підвищується її жорсткість, що супроводжується зменшенням плями контакту, оскільки за однакової радіальної навантаги у баластованій шини деформація буде меншою.

Аналіз складових жорсткості шини показує, що жорсткість протектора $C_{\text{штп}}$ суттєво перевищує жорсткість каркасу разом зі стисненим повітрям $C_{\text{штк}}$ та в діапазоні експлуатаційних навантаг **Е** (рис. 2, а) має величину в 10–20 разів більшу. Жорсткість протектора $C_{\text{штп}}$, головним чином, залежить від радіальної навантаги та зростає пропорційно до неї. Внутрішній тиск також має значний вплив на $C_{\text{штп}}$, причому з підвищенням тиску жорсткість знижується. Це пояснюється тим, що з підвищенням тиску жорсткість каркасу зі стисненим повітрям $C_{\text{штк}}$ суттєво зростає, пропорційно росту тиску і незалежно від радіальної навантаги (рис. 2, а). Внаслідок зростання жорсткості каркасної оболонки шини доля деформації або радіального прогину протектора f_n у загальному прогині зростає з 4 % при 0,6 бар до 8 % при 1,6 бар у зоні експлуатаційних навантаг **Е**.

Загальна радіальна жорсткість шини $C_{\text{ш}}$, головним чином, залежить від жорсткості каркасу $C_{\text{штк}}$, тому тиск у шині є визначальним фактором. Разом з цим слід відзначити, що при малих навантагах вплив жорсткості протектора $C_{\text{штп}}$ суттєвий, але при навантагах понад 50 % ($k_n > 50\%$) від допустимих деформація протектора f_n мало впливає на жорсткість шини, яка тепер залежить практично тільки від внутрішнього тиску. Таким чином, можна вважати, що в зоні експлуатаційних навантаг **Е** жорсткість шини залежить практично тільки від внутрішнього тиску повітря і не залежить від

радіальної навантаги.

У разі баластування рідиною на 75 % від об'єму внутрішньої порожнини жорсткість протектора $C_{\text{штп}}$ (рис. 2, б) не змінюється, а жорсткість каркасу зі стиснутим повітрям $C_{\text{штк}}$ змінюється відносно небаластованої рідиною шини. Якщо у шини без рідкого баласту жорсткість каркасу $C_{\text{штк}}$ залежала тільки від внутрішнього тиску (рис. 2, а), то при заповненні на 75 % рідиною на $C_{\text{штк}}$ уже впливає і радіальна навантага (рис. 2, б).

Пояснюється це наступним чином. У небаластованій рідиною шини при зростанні радіального прогину $f_{\text{ш}}$ з підвищенням k_n від 0 до 100% значення коефіцієнту підвищення тиску $k_{\text{ш}}$ (17) становить 1,01–1,025. Тобто, тиск в шині підвищується на 1–2,5%, а жорсткість шини за рахунок підвищення тиску зростає на величину до 1 %. При баластуванні рідиною частка зміни об'єму внутрішньої порожнини шини ΔV при деформуванні (4) суттєво збільшується з 1,5–2 % до 6–7 %. Це спричиняє зростання тиску на 9–11 % проти 1–2,5 % у порожньої шини. Як наслідок, жорсткість зростає на 3,5–5,5 %, що дозволяє підвищити допустиму навантагу на 6–8 %.

Жорсткість шини при заповненні рідиною на 40% займає проміжне положення між порожньою і заповненою на 75 %. При радіальному деформуванні тиск повітря в шині зростає на 4–5 %, і, як наслідок, жорсткість збільшується на величину близько 1 %.

Таким чином, можна констатувати, що при баластуванні рідиною на 75 % об'єму жорсткість шини зростає на 3,5–5,5 %, а при баластуванні на 40 % об'єму – на 1 %. Тому, характеристика жорсткості шини у першому випадку різниться з порожньою шиною (рис. 3, а), а у другому – практично співпадає (рис. 3, б).

При баластуванні шини на 75 % об'єму вага води складає 10,5 кН, а розчину хлориду кальцію (CaCl_2 , 0,4 кг/л) – 12,5 кН. При баластуванні на 40% об'єму вага води складає 5,6 кН, а розчину хлориду кальцію – 6,7 кН.

Найменший максимальний тиск на ґрунт шина має замінімально допустимого внутрішнього тиску, тому вважатимемо, що баластувати шину будемо саме з такого режиму експлуатації.

Так, небаластована шина експлуатується на режимах по лінії A_1A_2 (рис. 4, 5). При заповненні на 75 % об'єму водою або додаванні баластних вантажів вагою 10,5 кН (рис. 4, а) максимальний тиск становитиме: для баластування водою 144–146 кПа (лінія A_1A_2),

для баластних вантажів 135–138 кПа (лінія B_1B_2). В першому випадку внутрішній тиск повітря зберігається рівним 0,06 МПа, а у другому його необхідно підвищити до 0,09 МПа.

При заповненні на 75 % об'єму розчином хлориду кальцію або додаванні баластних вантажів вагою 12,5 кН (рис. 4, б) максимальний тиск становитиме: для баластування розчином $CaCl_2$ 151–153 кПа (лінія A_1A_2), для баластних вантажів 143–145 кПа (лінія B_1B_2). В першому випадку внутрішній тиск повітря також зберігається рівним 0,06 МПа, а у другому його необхідно підвищити до 0,10 МПа.

При заповненні на 40 % об'єму водою або додаванні баластних вантажів вагою 5,6 кН (рис. 5, а) максимальний тиск становитиме: для баластування водою 108–110 кПа (лінія A_1A_2), для баластних вантажів 103–104 кПа (лінія B_1B_2). В першому випадку внутрішній тиск повітря зберігається рівним 0,04 МПа, а в другому його необхідно підвищити практично до 0,06 МПа.

При заповненні на 40 % об'єму розчином хлориду кальцію або додаванні баластних вантажів вагою 6,7 кН (рис. 5, б) максимальний тиск становитиме: для баластування розчином $CaCl_2$ 112–114 кПа (лінія A_1A_2), для баластних вантажів 107–109 кПа (лінія B_1B_2). В першому випадку внутрішній тиск повітря також зберігається рівним 0,04 МПа, а в другому його необхідно підвищити до 0,065 МПа.

Таким чином, максимальний тиск на ґрунт при баластуванні рідиною на 4,5–6,5 % є вищим у порівнянні з додаванням баластних вантажів. Це пояснюється таким саме підвищенням жорсткості шини і, як наслідок, зменшенням радіального прогину і площі плями контакту з ґрунтом.

Особливістю баластування шин рідиною є відмінний характер розподілу максимального тиску на ґрунт у полі режимів роботи шини у порівнянні з порожньою шиною. При цьому особливу увагу слід приділяти коректному регулюванню внутрішнього тиску повітря в шині. Так, наприклад, якщо шина експлуатується в режимі, що відповідає точці A_2 (рис. 4, б), а внутрішній тиск перевищено на 0,04 МПа (0,4 бар), то порожня шина матиме максимальний тиск на ґрунт 140 кПа, а баластована розчином хлориду кальцію – 195 кПа. Такий високий тиск на ґрунт (195 кПа) дозволить експлуатувати шину лише на 3,7 % території України без порушення агроекологічних норм [14]. Взагалі,

при зростанні максимального тиску на ґрунт внаслідок підвищення внутрішнього тиску, шина стрімко стає екологічно небезпечною, тому її застосування повинно обмежуватись.

При недовантаженні радіальною навантагою шини, баластованої рідиною, максимальний тиск на ґрунт зростає, а у порожньої шини – зменшується. Різний характер ліній рівного максимального тиску на ґрунт баластованої рідиною і порожньої шини пояснюється наступним чином. У порожньої шини при зменшенні радіальної навантаги за постійного внутрішнього тиску повітря максимальний тиск на ґрунт знижується, оскільки зменшення навантаги випереджає зменшення площі плями контакту. У баластованої водою шини цей ефект посилюється завдяки більшій жорсткості, але, на противагу йому, при зниженні радіальної навантаги частка маси баластної рідини у формуванні зчпної ваги, збільшується, оскільки її маса незмінна, а площа контакту постійно знижується. Тому, як це не парадоксально, максимальний тиск на ґрунт баластованої рідиною шини остається практично постійним при навантагах 75–100 % при заповненні на 75 % і 50–100 % – при заповненні на 40 %. При менших навантагах максимальний тиск на ґрунт не знижується, а навпаки, стрімко зростає (рис. 4, 5).

З огляду на все вищезазначене, раціональними з точки зору зниження максимального тиску на ґрунт завжди є режими експлуатації шини за мінімально допустимого внутрішнього тиску повітря. В подальших дослідженнях доцільно визначити показники тягової ефективності при застосуванні різних способів баластування трактора.

Висновки

На основі матеріалів даної роботи проведено теоретичний аналіз максимального тиску тракторних сільськогосподарських шин на ґрунт при різних способах баластування трактора, що відображено в наступних наукових результатах.

1. Основним параметром, що має вирішальний вплив на рівень максимального тиску на ґрунт, є внутрішній тиск повітря в шині. В зоні експлуатаційних навантаж радіальна навантага на порожню шину мало впливає на максимальний тиск на ґрунт, а у шин, заповнених на 40–75 % рідиною, такий вплив взагалі відсутній.

2. При баластуванні рідиною жорсткість шини зростає на 3,5–5,5 % при заповненні на

75 % і практично не змінюється при заповненні на 40 %. Площа плями контакту зменшується на такий саме відсоток внаслідок меншого прогину за однакової радіальної навантаги. Теоретично вантажопідйомність шини при наповненні рідиною на 75 % зростає на 6–8 % при досягненні радіального прогину, що відповідає статичному. На практиці такий запас вантажопідйомності не використовується, оскільки в технічних умовах на шину лімітується саме радіальна навантага, а не прогин шини.

3. Баластування тракторних шин водою або незамерзаючим розчином хлориду кальцію є ефективним засобом підвищення зчіпної ваги трактора, оскільки маса баластної рідини може становити до 30–35 % від допустимої радіальної навантаги при наповненні на 75 % внутрішнього об'єму і до 21–25 % – при наповненні на 40 %.

Перевага баластування шин рідиною полягає у тому, що не підвищується радіальна навантага на шину, тому такий спосіб збільшення зчіпної ваги трактора може рекомендуватися у випадках, коли шина практично не має запасу вантажопідйомності, тобто іншими засобами підвищити зчіпну вагу неможливо. До недоліків слід віднести: підвищення жорсткості шини і збільшення невіддресореної маси трактора, що негативно впливатиме на його плавність руху. Також процедура наповнення і опорожнення шин потребує додаткового обладнання.

Установка баластних вантажів є універсальним способом підвищення зчіпної ваги трактора; при цьому максимальний тиск на ґрунт на 4,5–6,5 % нижчий у порівнянні з наповненням шин рідиною.

4. Раціональними, з точки зору зниження максимального тиску на ґрунт, у всіх випадках завжди є режими експлуатації шини за мінімально допустимого внутрішнього тиску повітря.

На відміну від порожніх, у заповнених баластною рідиною шин максимальний тиск на ґрунт залишається практично постійним при навантагах 75–100 % від допустимих при заповненні на 75 % і 50–100 % – при заповненні на 40 %. При менших навантагах максимальний тиск на ґрунт у баластованих рідиною шин (на відміну від порожніх) не знижується, а навпаки, стрімко зростає.

У разі перевищення необхідної величини внутрішнього тиску в шині пропорційно зростає максимальний тиск на ґрунт, тому в експлуатації внутрішній тиск завжди повинен відповідати радіальній навантазі.

Література

1. Goodyear tires. Ag Databook. URL: <https://www.titan-intl.com> (дата звернення: 07.10.2019).
2. Ребров О.Ю., Шевцов В.М., Чепкий К.С. Статистичні дані щодо сучасних тракторів провідних світових виробників. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: Міжнародна наукова конференція MicroCAD. (Харків, 16 травня, 2019). НТУ «ХПИ», 2019. Ч. 1. С. 222.
3. Гуськов А.В. Оптимизация тягово–сцепных качеств тракторных шин. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 2007. № 7. С. 19 – 21.
4. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. Москва: ВИМ, 1998. 368 с.
5. Водяник И.И. Воздействие ходовых систем на почву (научные основы). Москва: Агропромиздат, 1990. 172 с.
6. Wong, J.Y. (Jo Yung) Theory of ground vehicles.–3rd ed. 2001. 528 p.
7. Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. Москва: Агропромиздат, 1985. 304 с.
8. Гуськов В.В. Тракторы: теория / под общ. ред. В.В. Гуськова. – Москва: Машиностроение, 1988. 377 с.
9. Damanauskas V., Janulevičius A., Pupinis G. Influence of Extra Weight and Tire Pressure on Fuel Consumption at Normal Tractor Slippage. *Journal of Agricultural Science*, 2015. Vol. 7. No. 2. P. 55 – 67. doi: 10.5539/jas.v7n2p55.
10. Battiato A., Diserens E., Laloui L., Sartori L. A Mechanistic Approach to Topsoil Damage due to Slip of Tractor Tyres. *Journal of Agricultural Science and Applications*, 2013. № 2(3). P. 160 – 168. doi: 10.14511/jasa.2013.020305.
11. Keller T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, 2005. № 92(1). P. 85 – 96. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.05.012.
12. Srinivasa Rao S., Ramji K., Naidu M.K. Analytical approach for the prediction of steady state tyre forces and moments under different normal pressure distributions. *Journal of Terramechanics*, 2012. № 49. P. 281 – 289. doi: 10.1016/j.jterra.2012.10.002.
13. Taghavifar H., Mardani A. Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire *Journal of Terramechanics*, 2013. № 50, P. 99 – 106. doi: 10.1016/j.jterra.2013.01.005.
14. Ребров О. Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України / О. Ю. Ребров // *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. – Харків: НТУ «ХПИ», 2018. – № 27 (1303). – С. 110–116.

15. Ребров О.Ю. Аналіз відповідності максимального тиску на ґрунт тракторної шини агроекологічним вимогам ймовірнісним методом з урахуванням ґрунто-кліматичних умов України. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, 2017. № 14 (1236). С. 58–64.
16. Ребров О.Ю. Інтегральна ймовірнісна оцінка відповідності тракторної шини агроекологічним вимогам в ґрунтокліматичних умовах України. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, 2017. № 6 (1228). С. 127–136.
17. Бидерман, В.Л., Гуслицер Р.Л., Захаров С.П., Ненахов Б.В., Селезнев И.И., Цукерберг С.М. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытания, эксплуатация). Москва: Госхимиздат, 1963. 384 с.
18. ДСТУ 4428:2005 Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. Київ, 2006. 8 с.
10. Battiato A., Diserens E., Laloui L., Sartori L. (2013) A Mechanistic Approach to Topsoil Damage due to Slip of Tractor Tyres. *Journal of Agricultural Science and Applications*, 2(3), 160 – 168. doi: 10.14511/jasa.2013.020305.
11. Keller T. (2005) A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, 92(1), 85 – 96. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.05.012.
12. Srinivasa Rao S., Ramji K., Naidu M. K. (2012) Analytical approach for the prediction of steady state tyre forces and moments under different normal pressure distributions. *Journal of Terramechanics*, 49, 281 – 289. doi: 10.1016/j.jterra.2012.10.002.
13. Taghavifar H., Mardani A. (2013) Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *Journal of Terramechanics*, 50, 99 – 106. doi: 10.1016/j.jterra.2013.01.005.
14. Rebrov O.Yu. (2018) Rozpodil dopustymoho tysku na grunt khodovykh system kolisnykh traktoriv za terytorieiu Ukrainy [Distribution of permissible pressure to the soil of wheeled tractor systems in Ukraine]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, 27 (1303), 110–116. [in Ukrainian].
15. Rebrov O.Yu. (2017) Analiz vidpovidnosti maksymalnoho tysku na grunt traktornoї shyny ahroekolohichnym vymoham ymovirnostnym metodom z urakhuvanniam ґrunto-klimatychnykh umov Ukrainy. [The analysis of the tractor tires maximum pressure on the soil and its compliance to agro-ecological requirements by using the probabilistic method and taking into account soil and climatic conditions of Ukraine] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, 14 (1236), 58 – 64. [in Ukrainian].
16. Rebrov O.Yu. (2017) Intehralna ymovirnisna otsinka vidpovidnosti traktornoї shyny ahroekolohichnym vymoham v ґruntoklimatychnykh umovakh Ukrainy. [Integral probability estimate of the conformity of a tractor tire to the agro-ecological requirements in the soil and climatic conditions of Ukraine] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, 6 (1228), 127 – 136. [in Ukrainian].
17. Бидерман В.Л., Гуслицер Р.Л., Захаров С.П., Ненахов Б.В., Селезнев И.И., Цукерберг С.М. (1963) Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытания, эксплуатация) [Car tires (design, calculation, testing, operation)]. Москва: Госхимиздат. 384. [in Russian].
18. DSTU 4428:2005 (2006) Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. [Techniques agricultural mobil. The determination methods of the running systems impact on the soil]. Kyiv, 8 p. [in Ukrainian].

Reference

1. Goodyear tires. Ag Databook. Retrived from: <https://www.titan-intl.com> (accessed: 07.10.2019).
2. Rebrov O.Yu., Shevtsov V.M., Chepkyi K.S. (2019) Statystychni dani shchodo suchasnykh traktoriv providnykh svitovykh vyrobnykiv [Statistics on modern tractors from the world's leading manufacturers]. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia: Mizhnarodna naukova konferentsiia MicroCAD*. (Kharkiv, 16 travnia, 2019) [in Ukrainian].
3. Guskov A.V. (2007) Optimizatsiya tyagovo-stsepnnykh kachestv traktornykh shin [Optimization of traction and coupling qualities of tractor tires]. *Tractors and agricultural machinery*. 7, 19–21. [in Russian].
4. Rusanov V.A. (1998) Problema pereuplotneniya pochv dvizhatelyami i effektivnyie puti ee resheniya [The problem of soil compaction by movers and effective ways to solve it]. *Moskva: VIM*. 368. [in Russian].
5. Vodyanik I.I. (1990) Vozdeystvie hodovykh sistem na pochvu (nauchnyie osnovyi) [The impact of suspension systems on the soil (scientific basis)]. *Moskva: Agropromizdat*. 172. [in Russian].
6. Wong J.Y. (2001) (Jo Yung) Theory of ground vehicles.–3rd ed. 528. [in English]
7. Ksenevich I.P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I. (1985) Hodovaya sistema – pochva – urozhay [Running system – soil – crop]. *Moskva: Agropromizdat*, 304. [in Russian].
8. Guskov V.V. (1988) Traktoryi: teoriya [Tractors: theory] / pod obsch. red. V. V. Guskova. *Moskva: Mashinostroenie*. 377. [in Russian].
9. Damanauskas V., Janulevičius A., Pupinis, G. (2015) Influence of Extra Weight and Tire Pressure on Fuel Consumption at Normal Tractor Slippage. *Journal of Agricultural Science*, Vol. 7, No. 2, 55 – 67. doi: 10.5539/jas.v7n2p55.

Ребров Олексій Юрійович, к.т.н., доц., кафедра автомобіле- та тракторобудування, тел.: (057) 707 – 64 – 64, e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, м. Харків, 61002, вул. Кирпичова, 2.

Определение максимального давления на почву сельскохозяйственных шин при разных способах балластировки трактора

Аннотация. Приведен теоретический анализ уровня максимального давления на грунт тракторных сельскохозяйственных шин при различных способах балластировки трактора. Анализ учитывает изменение жесткости шины, радиального прогиба, грузоподъемности и площади пятна контакта с почвой при повышении сцепного веса трактора за счет установки балластных грузов и наполнения шин балластной жидкостью. Установлено, что при балластировке жидкостью жесткость шины возрастает на 3,5–5,5 % при заполнении на 75 % и практически не изменяется при заполнении на 40 %. Установка балластных грузов является универсальным способом повышения сцепного веса трактора, при этом максимальное давление на почву на 4,5–6,5 % ниже по сравнению с наполнением шин жидкостью.

Ключевые слова: максимальное давление на почву, балластировка трактора, жесткость шины, радиальная нагрузка на шину, давление воздуха в шине.

Ребров Алексей Юрьевич, к.т.н., доц., кафедра автомобиле- и тракторостроения, тел.: (057) 707 – 64 – 64, e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина, Харьков, 61002, ул. Кирпичёва, 2

Determination of the maximum pressure on the soil of agricultural tires with different ballasting methods of tractor

Abstract. The theoretical analysis of the maximum pressure on the soil of tractor tires with different methods of tractor ballasting is presented. The mathematical model of an empty and liquid ballasted agricultural tire is presented. **Problem.** As the standards of the running systems of mobile agricultural machinery on the soil limit the maximum pressure of wheeled tractors on the soil, there is a contradiction between high traction efficiency and harmful effects on the environment. The **goal** of the research is to perform a comparative analysis of the maximum tire pressure on the soil with two methods of increasing the tractor's weight: by installing cast iron ballast and filling the tires with ballast liquid. In solving the final goal, a **methodology** that provided the analytical methods for evaluating the effect of the tire filling with ballast fluid on its stiffness, load capacity and the area of contact area with the soil, is used. As a **result** it has been found that the tire stiffness increases by 3.5–5.5% when filled with 75% and practically does not change when filled with 40% by liquid ballasting. Cast iron ballasting is a versatile way to increase tractor weight, with maximum soil pressure 4.5–6.5% lower than tire liquid filling. Options for 75% and 40% liquid ballast for the use of water and calcium chloride solution as ballast liquid are considered. The **originality** of the work is to determine the maximum pressure on the soil of the agricultural tire ballasted with liquid and to compare it with traditional cast iron ballasting by the level of maximum pressure on the topsoil. The **practical value** of the work is, at the stage of designing or upgrading the wheeled tractor, to provide recommendations on possible method of the tractor ballasting, taking into account the agro-environmental requirements for maximum soil pressure.

Key words: maximum soil pressure, tractor ballasting, tire stiffness, radial tire load, tire air pressure.

Rebrov Oleksii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associated Professor at the Department of Car and Tractor Industry, tel.: (057) 707 – 64 – 64, e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine.