

## АНАЛІЗ МАКСИМАЛЬНОГО ТИСКУ НА ҐРУНТ ТРАКТОРНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ШИН ПРИ ЇХ ЗАПОВНЕННІ РІДИНОЮ

**Ребров О.Ю.**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

*В статті наведений аналіз максимального тиску на ґрунт тракторних сільськогосподарських шин при їх баластуванні рідиною, оскільки такий спосіб підвищення зчпної ваги трактора суттєво відрізняється від традиційного встановлення баластної. Розглянуто два варіанти: баластування одинарних шин при заповненні їх на 75% об'єму та баластування здвоєних шин при заповненні їх на 40%. Встановлений рівень підвищення максимального тиску на ґрунт та особливості формування характеристик жорсткості порожньої і заповненою рідким баластом шини.*

*Для визначення максимального тиску тракторної шини на ґрунт розглянуті питання складових роботи по деформуванню шини. Встановлена необхідна робота по статичному деформуванню каркаса, стисненню повітря і деформуванню протектору шини за якими отримані аналітичні залежності для визначення складових жорсткості шини. Модель шини представлена у вигляді паралельно-последовного з'єднання пружних елементів з жорсткістю, що відповідає пружності каркасу, протектору і стисненого повітря. Розглянута зміна складових жорсткості шини залежно від внутрішнього тиску і радіальної навантаги.*

*Виявлено, що для шин, заповнених рідиною, змінюється складова жорсткості, що відповідає стисненню повітря, оскільки суттєво змінюється частка об'єму, викликана радіальним прогином шини по відношенню до об'єму, заповненому повітрям. Це спричиняє підвищення жорсткості для шин, заповнених на 75% від внутрішнього об'єму. Для шин, заповнених на 40% зміна жорсткості несуттєва.*

*Встановлено, що максимальний тиск на ґрунт заповненої на 75% шини зростає на 40-45кПа в зоні експлуатаційних навантаг, а при можливому зниженні тиску на 0,1 бар – на 30-35 кПа. При заповненні на 40% від об'єму, що рекомендують для здвоєних шин, максимальний тиск на ґрунт в зоні експлуатаційних навантаг підвищується на 20-25 кПа.*

*Визначено, що на відмінну від порожніх у заповнених баластною рідиною шин максимальний тиск на ґрунт остається 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.*

**Ключові слова:** тракторна шина, баластування шин рідиною, жорсткість шини, радіальна навантага на шини, тиск повітря в шині.

### **Вступ**

Ефективність використання колісних сільськогосподарських тракторів на тягових технологіях визначається комплексом параметрів, основними з яких є потужність двигуна та зчпна вага трактора. Відношення потужності двигуна до ваги трактора визначає його енергонасиченість. За показником енергонасиченості закордонні спеціалісти рекомендують

обирати ступінь баластування трактора [1]. Для тракторів класичної компоновки з передніми колесами меншого діаметру і автоматичним підключенням переднього мосту (MFWD – mechanical front wheel drive) рекомендується 120-145 lb/hr (120-145 фунтів на британську кінську силу), що відповідає енергонасиченості 11,6-14,0 кВт/т. Для тракторів з ведучими колесами однакового розміру (4WD – four wheel drive) рекомендується 85-125 lb/hr (85-125 фунтів на британську кінську силу), що відповідає енергонасиченості 13,4-19,7 кВт/кН.

Аналіз понад 800 тракторів світових виробників [2], які присутні на ринку, показав, що енергонасиченість тракторів із синхронізованими трансмісіями становить 13,3-33,8 кВт/т, PowerShift – 12,4-28,6 кВт/т, безступінчастими (CVT) – 12,3-30,0 кВт/т. Такі дані свідчать про те, що світові виробники пропонують трактори з суттєвим запасом потужності по відношенню до його маси. Для таких тракторів вся потужність двигуна не може бути реалізована в тяговому технологічному процесі. Граничне значення енергонасиченості для тракторів тягової концепції складає близько 20 кВт/т. Так, частка тракторів з енергонасиченістю більше 20 кВт/т для синхронізованих трансмісій складає 60%, для PowerShift – 25%, для безступінчастих трансмісій – 40%. Високий рівень енергонасиченості трактора вимагає суттєвого баластування для повної реалізації потужності двигуна в тяговому режимі. Однак, для підвищення маси трактора необхідно мати запас вантажопідйомності шин, яким можна скористатися при відповідному підвищенні внутрішнього тиску в шині, що буде супроводжуватись зростанням максимального тиску на ґрунт. На відміну від традиційного металевго баласту, наповнення шин водою не вимагає запасу вантажопідйомності оскільки не підвищує радіальну навантагу на шину. Також такий спосіб баластування є найдешевшим і технічно легко реалізується.

З огляду на вищезазначене, актуальним постає питання аналізу максимального тиску на ґрунт тракторних шин, що баластують водою або незамерзаючим розчином хлориду кальцію.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Взаємодія трактора з ґрунтом розглянута у ряді фундаментальних праць [3-8], де вирішуються задачі тягової ефективності та дії шини на ґрунт, але в них відсутня інформація щодо баластування шин трактора водою. Іншим напрямом досліджень максимального тиску трактора на ґрунт є робота [9], де запропонована методика оцінки впливу на ґрунт ходових систем колісних тракторів згідно з встановленим розподілом за територією України допустимого тиску на ґрунт колісних тракторів відповідно до вимог стандарту. Методика враховує особливості ґрунто-кліматичних умов та фактичних середньо-багаторічних параметрів вмісту вологи в ріллі в середньо-багаторічні терміни проведення робіт під час підготовки ґрунту під ранні ярові культури навесні та під озиму пшеницю в літньо-осінній період.

У закордонній технічній літературі теж не приділено увагу питанню баластування шин водою, а вся інформація з цього приводу обмежуються описом процесу наповнення шини водою.

Таким чином, обґрунтування рівня максимального тиску на ґрунт колісних сільськогосподарських тракторів при баластуванні їх шин водою в літературі відсутнє.

## Постановка проблеми

Метою даної роботи є аналіз чинників і факторів, що впливають на рівень максимального тиску на ґрунт тракторної шини, яка наповнюється водою або незамерзаючим розчином хлориду кальцію в якості баласту. Оскільки максимальний тиск на ґрунт залежить від площі плями контакту і еластичності шини, необхідно встановити залежність жорсткості від радіальної навантаги, внутрішнього тиску і рівня наповнення водою, яке може досягати 75% від об'єму одиночної шини і 40% зведеної.

## Аналіз максимального тиску на ґрунт тракторних шин

Для проведення аналізу максимального тиску на ґрунт необхідно розглянути радіальну деформацію або прогин шини, який складається з прогину каркасу зі стисненим повітрям і прогину протектору.

Частина радіального прогину  $f_k$ , обумовлена деформацією каркасу і стисненням повітря при зміні об'єму, визначається залежністю, м:

$$f_k = c_2 \cdot \frac{G_k}{p_m + p_0}, \quad (1)$$

де  $c_2$  – постійний коефіцієнт,  $1/\text{м}; p_0$ , – постійний для шини коефіцієнт, що характеризує жорсткість каркасу кПа;  $G_k$  – радіальна навантага на шину, кН;  $p_m$  – внутрішній тиск повітря в шині, кПа. Частина радіального прогину  $f_n$ , яка обумовлена деформацією протектора, визначається залежністю, м:

$$f_n = c_1 \cdot \frac{G_k}{f_m}, \quad (2)$$

де  $c_1$  – постійний коефіцієнт,  $\text{м}^2/\text{кН}; f_m$  – радіальний прогин шини, м:

$$f_m = f_n + f_k = c_1 \cdot \frac{G_k}{f_m} + c_2 \cdot \frac{G_k}{p_m + p_0}. \quad (3)$$

Рішенням рівняння (3) відносно радіальної навантаги є універсальна характеристика шини [8, 10]:

$$G_k = \frac{f_m^2}{c_1 + c_2 \cdot \frac{f_m}{p_m + p_0}}. \quad (4)$$

В результаті перетворень (4) отримаємо:

$$f_m^2 - \frac{G_k \cdot c_2}{p_m + p_0} \cdot f_m - c_1 \cdot G_k = 0. \quad (5)$$

Після відкидання зайвого кореня, рішення рівняння універсальної характеристики (5) відносно радіальної деформації  $f_m$ , отримаємо залежність від радіальної навантаги:

$$f_m = \frac{c_2 \cdot G_k}{2 \cdot (p_m + p_0)} + \sqrt{\left( \frac{c_2 \cdot G_k}{2 \cdot (p_m + p_0)} \right)^2 + c_1 \cdot G_k}, \quad (6)$$

Наведена характеристика шини отримана при розгляді роботи по статичному деформуванню шини:

$$A_{\text{ш}} = A_{\text{к}} + A_{\text{в}} + A_{\text{п}}, \quad (7)$$

де  $A_{\text{к}}$  – робота деформації каркаса, кДж;  $A_{\text{в}}$  – робота по стисненню повітря в шині, кДж;  $A_{\text{п}}$  – робота деформації протектора, кДж.

$$A_{\text{к}} = \frac{P_0 \cdot f_{\text{к}}^2}{2 \cdot c_2} = P_0 \cdot \Delta V, \quad (8)$$

де  $\Delta V$  – зміна об'єму внутрішньої порожнини шини при деформуванні, м<sup>3</sup>.

$$\Delta V = \frac{f_{\text{к}}^2}{2 \cdot c_2}, \quad (9)$$

$$A_{\text{в}} = \frac{P_{\text{ш}} \cdot f_{\text{к}}^2}{2 \cdot c_2} = P_{\text{ш}} \cdot \Delta V. \quad (10)$$

$$A_{\text{п}} = \frac{f_{\text{п}}^2 \cdot (3 \cdot f_{\text{к}} + 2 \cdot f_{\text{п}})}{6 \cdot c_2}. \quad (11)$$

Якщо взяти похідну виразу (7) з урахуванням (8)-(10) за відповідною деформацією, отримаємо величину радіальної навантаги на шину:

$$G_{\text{к}} = \frac{(P_0 + P_{\text{ш}})}{c_2} \cdot f_{\text{к}} + \frac{f_{\text{п}} + f_{\text{к}}}{c_1} \cdot f_{\text{п}}. \quad (12)$$

Якщо взяти похідну виразу (11) за відповідною деформацією, отримаємо величину радіальної жорсткості каркасу і протектору, кН/м:

$$C_{\text{шк}} = \frac{(P_0 + P_{\text{ш}})}{c_2} = \frac{P_0}{c_2} + \frac{P_{\text{ш}}}{c_2} = C_{\text{к}} + C_{\text{в}}, \quad (13)$$

де  $C_{\text{к}}$  – жорсткість шини, яка обумовлена деформацією каркасу, кН/м,  $C_{\text{в}}$  – жорсткість шини, яка обумовлена стисканням повітря, кН/м.

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

Таким чином, загальна жорсткість шини визначається як для послідовного з'єднання пружних елементів: протектору і каркасу з повітрям, кН/м:

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

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:

$$p \cdot V^n = \text{const}$$

де  $n$  – показник політропи.

При динамічному навантаженні пневматичних шин, що відповідає режимам коливань підвіски на нерівностях шляху, швидкість зміни об'єму газу велика. Внаслідок низької теплопровідності гумово-кордної оболонки, теплообмін з оточуючим середовищем ускладнено, теплоємність газу можна вважати постійною, тобто для газу має місце адиабатичний процес. Тому показник політропи  $n$  може бути прийнятий рівним 1,4.

Отже зміну тиску в шині опишемо коефіцієнтом підвищення тиску:

$$k_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{шд}}}{P_{\text{ш0}}} = \left( \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{ш}} - \Delta V} \right)^n, \quad (16)$$

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, м<sup>3</sup>.

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

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

де  $V_{\text{в}}$  – об'єм води або незамерзаючого розчину для баластування, наведений в технічних даних на шину, м<sup>3</sup>.

Максимальне значення об'єму  $V_{\text{в}}$  баластної рідини для одинарної шини становить 75% від об'єму внутрішньої порожнини. Для здвоєної 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 здвоєної шини до 50%.

При використанні розчину хлориду кальцію ( $\text{CaCl}_2$ ) для експлуатації при температурі до  $-30^\circ\text{C}$  рекомендується концентрація 400 г/л. При цьому об'єм води становитиме  $0,85V_{\text{в}}$ , решта – хлорид кальцію. Для такої концентрації маса розчину для баластування, кг:

$$m_p = 0,85 \cdot V_{\text{в}} \cdot (\rho_{\text{в}} + \rho_{\text{CaCl}_2}), \quad (17)$$

де  $\rho_{\text{в}}$  – щільність води, кг/л;  $\rho_{\text{CaCl}_2}$  – концентрація хлориду кальцію (0,4 кг/л).

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

$$C_{\text{в}} = \frac{P_{\text{ш}}}{c_2} \cdot k_{\text{шв}}. \quad (18)$$

Підвищення жорсткості більш інтенсивно проявляється при низькому внутрішньому тиску повітря в шині [1].

Загалом баластування шин рідиною має як переваги, так і недоліки у порівнянні з традиційним баластуванням. До переваг слід віднести наступне. По-перше, при баластуванні водою її маса не навантажує шину в радіальному напрямі, оскільки сили тяжіння, що діють на воду не прикладені до вісі колеса і не передаються через обід диска на каркас шини. Цей факт дає змогу баластувати шину при відсутності запасу вантажопідйомності. Також немає потреби підвищувати внутрішній тиск повітря, якщо радіальна навантага небаластованої шини це дозволяє. Слід також відзначити, що при баластуванні шин водою необхідно чітко відрізнити поняття радіальної навантаги на шину і зчіпну вагу, яка передається на ґрунт. Другою перевагою є відносно низька вартість і простота баластування водою.

До недоліків слід віднести насамперед зменшення площі плями контакту шини з ґрунтом внаслідок підвищення її жорсткості при одночасному підвищенні зчіпної ваги, що передається шиною на ґрунт, на величину маси баластної води. Це сприятиме зростанню тиску на ґрунт у порівнянні з небаластованою шиною. Крім того, підвищення жорсткості шини може погіршити показники плавності руху трактора. Негативним також є зростання невіднесеної маси ходової системи, що завжди сприяє зростанню динамічних навантаж та

погіршенню плавності руху. І, наостанок, рідкий баласт схильний до інтенсивних коливань в процесі руху трактора та може сприяти погіршенню керованості, стійкості руху, а також гальмівної динаміки. Тому компанія John Deere рекомендує використовувати баластування рідиною тільки у випадках, коли іншими засобами неможливо отримати необхідну масу трактора та її розподіл між ведучими мостами [11].

### Аналіз результатів дослідження

Для аналізу максимального тиску на ґрунт розглянемо шину без води (порожню), шину максимально заповнену на 75% від об'єму внутрішньої порожнини, і здвоєну шину, заповнену на 40% від об'єму внутрішньої порожнини. Введемо коефіцієнт, який у відсотках характеризує навантагу на шину відносно допустимого значення:

$$k_n = \frac{G_k}{Q_d} \cdot 100\% , \quad (19)$$

де  $Q_d$  – допустима навантага на шину при даному тиску.

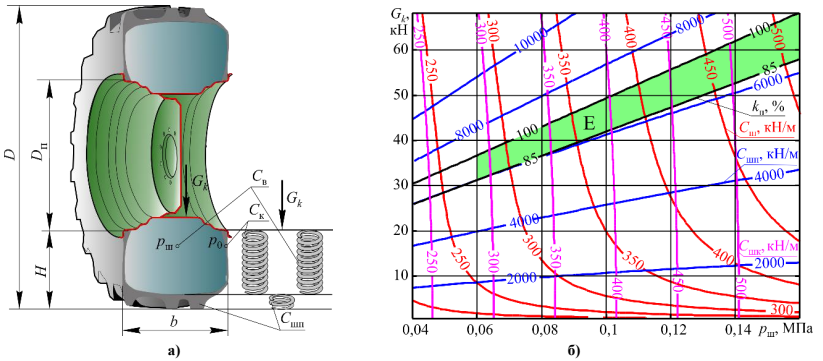
Аналіз будемо проводити на прикладі шини 800/70 R38 (173 A8) Michelin, яка за своїми техніко-експлуатаційними показниками є однією з найкращих.

При баластуванні шини рідиною зменшується об'єм повітря, що стискається при радіальній деформації, тому є всі передумови для підвищення жорсткості шини. Підвищення жорсткості супроводжується зниженням плями контакту оскільки при однаковій радіальній навантазі у баластованій шини деформація буде меншою. Проаналізуємо шину за розрахунковою схемою (рис. 1.а), де радіальна жорсткість наведена у вигляді паралельно-последовного з'єднання пружних елементів з жорсткостями  $C_k$  (жорсткість шини, обумовлена деформацією каркасу),  $C_b$  (жорсткість шини, обумовлена стисненням повітря),  $C_{шп}$  (жорсткість шини, обумовлена деформацією протектора). Жорсткості  $C_k$  і  $C_b$  будемо розглядати сумісно у вигляді складової  $C_{шк}$ , що залежить від параметрів шини та внутрішнього тиску повітря (13).

Аналіз показує, що жорсткість протектора  $C_{шп}$  суттєво перевищує жорсткість каркасу разом зі стисненим повітрям  $C_{шк}$  та в діапазоні експлуатаційних навантаг **Е** (рис. 1.б) має величину в 10-20 разів більше. Слід відзначити, що при коректно встановленому рівні тиску повітря шина буде експлуатуватись на режимах області **Е** при навантаженні на 85-100% ( $k_n = 85-100\%$ ) від допустимого. Мова йде про використання тракторів, виконаних за схемами 4K4a (MFWD) і 4K4b (4WD), на польових тягових операціях.

Жорсткість протектора  $C_{шп}$ , головним чином, залежить від радіальної навантаги та зростає пропорційно їй. Внутрішній тиск також має значний вплив на  $C_{шп}$ , причому з підвищенням тиску жорсткість знижується. Це пояснюється тим, що з підвищенням тиску жорсткість каркасу зі стисненим повітрям  $C_{шк}$  суттєво зростає, пропорційно росту тиску і незалежно від радіальної навантаги (рис. 1.б). Внаслідок зростання жорсткості каркасної оболонки шини доля деформації або радіального прогину протектора  $f_n$  у зальному прогині зростає з 4% при 0,6 бар до 8% при 1,6 бар в зоні експлуатаційних навантаг **Е**.

Загальна радіальна жорсткість шини  $C_{ш}$  головним чином залежить від жорсткості каркасу  $C_{шк}$ , тому тиск в шині є визначальним фактором. Разом з цим слід відзначити, що при малих навантагах вплив жорсткості протектору  $C_{шп}$  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.



**Рис.1. Тракторна сільськогосподарська шина: а – розрахункова схема; б – характеристика радіальної жорсткості та її складових для тракторної шини 800/70 R38 (173 A8) залежно від тиску повітря  $p_{ш}$  і радіальної навантаги  $G_k$**

Таким чином, можна вважати, що в зоні експлуатаційних навантаж **Е** жорсткість шини залежить практично тільки від внутрішнього тиску повітря і не залежить від радіальної навантаги.

При баластуванні водою на 75% від об'єму внутрішньої порожнини жорсткість протектору  $C_{шп}$  (рис. 2.а) не змінюється, а жорсткість каркасу зі стиснутим повітрям  $C_{шк}$  змінюється відносно небаластованої рідиною шини. Якщо у шини без рідкого баласту жорсткість каркасу  $C_{шк}$  залежала тільки від внутрішнього тиску (рис. 1.б), то при заповненні на 75% рідиною на  $C_{шк}$  уже впливає і радіальна навантага (рис. 2.а).

Пояснюється це наступним чином. У небаластованої шини при зростанні радіального прогину  $f_{ш}$  з підвищенням  $k_n$  від 0 до 100% значення коефіцієнту підвищення тиску  $k_{ш}$  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 водою частка зміни об'єму внутрішньої порожнини шини  $\Delta V$  при деформуванні (9) 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%.

При баластуванні водою на 40% об'єму, що рекомендують як максимальну величину для здвоєних шин, які при коректно встановленому рівні тиску повітря будуть експлуатуватися на режимах області **Е** (рис. 2.б) при завантаженні на 75-88% ( $k_n = 75-88\%$ ). Для здвоєної шини максимально допустима радіальна навантага досягається при  $k_n = 88\%$ . Жорсткість шини при 40% заповненні водою 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%.

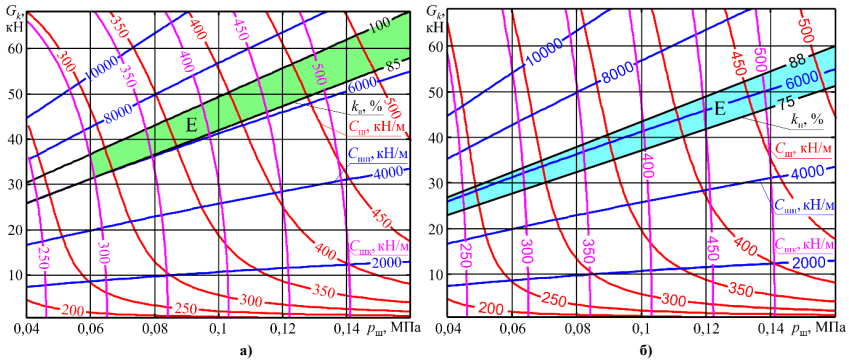


Рис.2. Радіальна жорсткість та її складові для тракторної шини 800/70 R38 (173 A8) залежно від тиску повітря  $p_w$  і радіальної навантаги  $G_k$ : а – шина, заповнена на 75% водою; б – шина, заповнена на 40% водою (здвоєна)

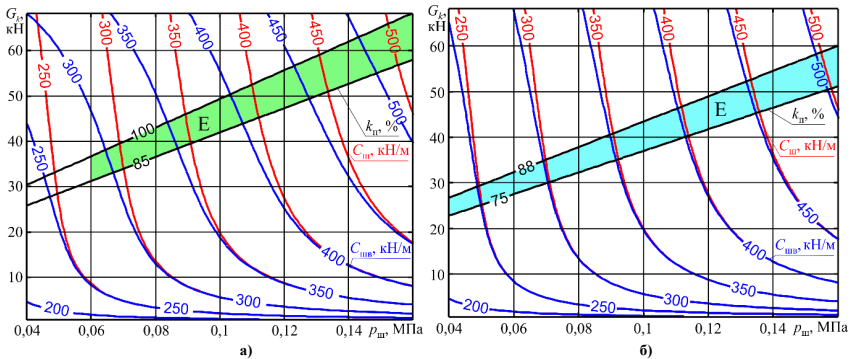
Таким чином, можна констатувати, що при баластуванні водою на 75% об'єму жорсткість шини зростає на 3,5-5,5%, а при баластуванні на 40% об'єму – на 1%. Тому характеристика жорсткості шини у першому випадку різниться з порожньою шиною (рис. 3.а), а у другому – практично співпадають (рис. 3.б)

Підвищення жорсткості шини спричиняє менший радіальний прогин при однаковій радіальній навантазі і, як наслідок, зменшення площі плями контакти з ґрунтом. Так, наприклад, розглянута шина при баластуванні водою на 75% об'єму має радіальний прогин 0,125-0,129 м при  $k_n = 100\%$  проти 0,134 м – у порожньої шини. Оскільки трактори експлуатуються при виконанні тягових сільськогосподарських операцій з великим крутним моментом на колесах, то, згідно європейських ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organization) [12] та американських TRA (The Tire and Rim Association) [13] рекомендацій, тиск в шині повинен відповідати радіальній навантазі згідно індексу швидкості А6 (30 км/год). При цьому в експлуатації прогин шини відповідає статичному, а площа плями контакту з твердою опорною поверхнею відповідає контурній площі, яка вказується виробниками в технічних даних на шину. Таким чином, фактором, що лімітує навантагу шини, є не сама навантага, а прогин шини. Оскільки прогин точно визначити в експлуатації практично не можливо, то лімітують радіальну навантагу, що можна легко визначити, наприклад, на вагах.

З огляду на вище зазначене, слід відмітити, що при підвищенні жорсткості на 3,5-5,5% при заповнюванні шини на 75% водою допустима навантага підвищується на 6-8% і більше для високоеластичних шин. Це можна використати для зниження внутрішнього тиску, оскільки при однаковій радіальній навантазі баластована водою шина потребує меншого внутрішнього тиску внаслідок підвищення вантажопідйомності. Як показує аналіз тиск в шині можна знизити на 0,1-0,15 бар.

Підвищення жорсткості також має негативний вплив на тиск на ґрунт оскільки сприяє зменшенню площі контакту шини на 5,5-6,5%, але його можна повністю компенсувати і, навіть, поліпшити вказаним зниженням внутрішнього тиску в шині.





**Рис.3. Порівняння радіальної жорсткості тракторної шини 800/70 R38 (173 A8) при заповненні на 75% і 40% водою залежно від тиску повітря  $p_w$  і радіальної навантаги  $G_k$ : а – порожня і заповнена на 75% водою шина; б – порожня і заповнена на 40% водою (здвоєна) шина**

Максимальний тиск на ґрунт визначається згідно стандарту [14] з урахуванням того, що маса баластної рідини не створює радіальну навантагу на шину, хоча, безумовно, дещо деформує каркас. Маса баластної води становить 15-30% від допустимої радіальної навантаги (при  $k_{т} = 100\%$ ), 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  $k_{т} = 88\%$  для здвоєних шин), а маса розчину хлориду кальцію – 11-25%.

Максимальний тиск на ґрунт при баластуванні на 75% від об'єму шини підвищується на 40-45 кПа (рис. 4.а) в зоні експлуатаційних навантаж Е.

При зниженні радіальної навантаги менше 85% від допустимої різниця максимального тиску на ґрунт баластованої і порожньої шини стрімко зростає. Якщо врахувати можливість зниження внутрішнього тиску приблизно на 0,1-0,15 бар за рахунок підвищення жорсткості шини, приріст максимального тиску сягатиме 30-35 кПа.

При баластуванні шини на 40% від об'єму, що рекомендують для здвоєних шин, максимальний тиск на ґрунт підвищується на 20-25 кПа (рис. 4.б) в зоні експлуатаційних навантаж Е. Для таких шин зниження тиску неможливе (становить менше 0,05 бар) внаслідок малого зростання радіальної жорсткості. Для здвоєних шин необхідно дотримуватись коректного тиску повітря, та намагатися створити режими для експлуатації при мінімально допустимому тиску. Зниження радіальної навантаги (при  $k_{т} < 75\%$  для здвоєних шин) також спричиняє різке зростання максимального тиску на ґрунт.

Загалом різний характер ліній рівного максимального тиску на ґрунт баластованої водою і порожньої шини пояснюється наступним чином. У порожньої шини при зменшенні радіальної навантаги при постійному внутрішньому 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 води в формуванні зчпної ваги збільшується оскільки її маса незмінна, а площа контакту постійно знижується. Тому, як це не парадоксально, максимальний тиск на ґрунт баластованої водою 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).

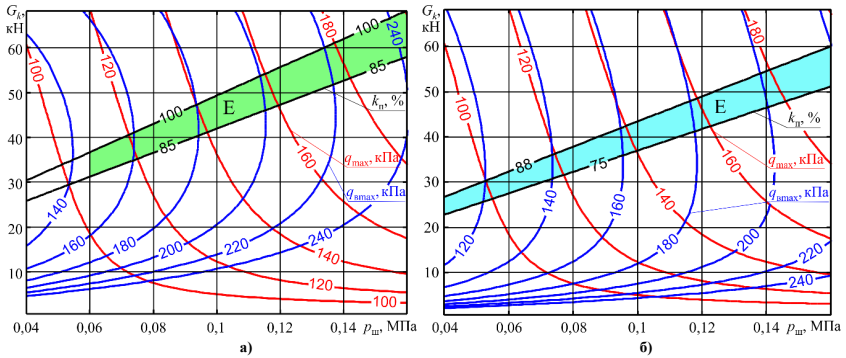


Рис.4. Максимальний тиск на ґрунт тракторної шини 800/70 R38 (173 A8) залежно від тиску повітря  $p_{ш}$  і радіальної навантаги  $G_k$ : а – порожня та заповнена на 75% водою шина; б – порожня та заповнена на 40% водою здвоєнна шина

### Висновки

Баластування тракторних сільськогосподарських 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 для одинарної шини, що відповідає підвищенню зчіпної ваги на величину до 43-54%. Для трактора, обладнаного здвоєними шинами, рекомендується однаковий тиск при наповненні на 40% внутрішнього об'єму для всіх шин ведучого моста, що відповідає підвищенню зчіпної ваги на величину до 26-33%.

Баластування рідиною не викликає підвищення радіальної навантаги 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.

При баластуванні рідиною жорсткість шини зростає на 3,5-5,5% при заповненні на 75% і практично не змінюється при заповненні на 40%. Зростання жорсткості дозволяє підвищити допустиму навантагу на 6-8%, що дає змогу експлуатувати наповнену на 75% шину при внутрішньому тиску на 0,1-0,15 бар нижчому.

Максимальний тиск на ґрунт заповненої на 75% шини зростає на 40-45кПа в зоні експлуатаційних навантаг, а при зниженні тиску на 0,1 бар – на 30-35 кПа. При заповненні на 40% від об'єму, що рекомендують для здвоєних шин, максимальний тиск на ґрунт в зоні експлуатаційних навантаг підвищується на 20-25 кПа.

На відміну від порожніх у заповнених баластною рідиною шин максимальний тиск на ґрунт остається 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.

### Перспективи подальших досліджень

Наведений аналіз максимального тиску на ґрунт тракторних шин при наповненні водою або незамерзаючим розчином виявив переваги і недоліки такого способу

баластування. В подальшому для практичного застосування необхідно провести аналіз підвищення тягової ефективності при такому способі баластування.

### Список використаних джерел

1. AG Tires. Experience the Goodyear advantage. URL: [https://www.titan-intl.com/media/Files/Volume\\_19\\_Ag\\_Databook\\_Web](https://www.titan-intl.com/media/Files/Volume_19_Ag_Databook_Web) (дата звернення: 07.10.2019).
2. Ребров О.Ю., Шевцов В.М., Чепкий К.С. Статистичні дані щодо сучасних тракторів провідних світових виробників // Міжнародна наукова конференція MicroCAD: - НТУ "ХПИ", 2019. URL: <http://archive.kpi.kharkov.ua/BrowseByAuthorHtml/4323/> (дата звернення: 11.10.2019).
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. 368с.
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 / J. Y. Wong.-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. Ребров О. Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. Вісник НТУ "ХПІ". Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологія: зб. наук. пр. 2018. № 27 (1303). С. 110-116.
10. 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. 384с.
11. John Deere 8R Series Tractors. URL: [http://www.deere.ua/common/docs/products/equipment/tractors/8r\\_2011\\_series/brochure/8r\\_tractor\\_YY1114102\\_E.pdf](http://www.deere.ua/common/docs/products/equipment/tractors/8r_2011_series/brochure/8r_tractor_YY1114102_E.pdf) (дата звернення: 11.10.2019).
12. European Tyre and Rim Technical Organisation – Standards Manual – 2019. URL: <https://www.etrto.org/Publications/Available/Standards-Manual> (дата звернення: 11.10.2019)
13. The Tire and Rim Association. TRA 2019 Publications. 2019 Year Book. URL: <http://www.us-tra.org/publications.html> (дата звернення: 11.10.2019).
14. ДСТУ 4428:2005 Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. Київ, 2006. 8 с.

### Аннотация

#### АНАЛИЗ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОЧВУ ТРАКТОРНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ШИН ПРИ ИХ НАПОЛНЕНИИ ЖИДКОСТЬЮ

**Ребров А.Ю.**

*В статье приведен анализ максимального давления на почву тракторных сельскохозяйственных шин при их балластировке жидкостью, поскольку такой способ*

повышения сцепного веса трактора существенно отличается от традиционной установки балластных грузов. Рассмотрены два варианта: балластировка одинарных шин при заполнении их на 75% объема и балластировка сдвоенных шин при заполнении их на 40%. Установленный уровень повышения максимального давления на почву и особенности формирования характеристик жесткости пустой и заполненной жидким балластом шины.

Для определения максимального давления тракторной шины на грунт рассмотрены вопросы составляющих работы по деформированию шины. Установлена необходимая работа по статическому деформированию каркаса, сжатию воздуха и деформированию протектора шины по которой получены аналитические зависимости для определения составляющих жесткости шины. Модель шины представлена в виде параллельно-последовательного соединения упругих элементов с жесткостью, что соответствует упругости каркаса, протектора и сжатого воздуха. Рассмотрено изменение составляющих жесткости шины в зависимости от внутреннего давления и радиальной нагрузки.

Выявлено, что для шин, заполненных жидкостью, меняется составляющая жесткости, соответствующая сжатию воздуха, поскольку существенно меняется доля объема, вызванная радиальным прогибом шины по отношению к объему, заполненному воздухом. Это приводит к повышению жесткости для шин, заполненных на 75% от внутреннего объема. Для шин, заполненных на 40% изменение жесткости незначительно.

Установлено, что максимальное давление на почву заполненной на 75% шины возрастает на 40-45 кПа в зоне эксплуатационных нагрузок, а при возможном снижении давления на 0,1 бар - на 30-35 кПа. При заполнении на 40% от объема, рекомендуемом для сдвоенных шин, максимальное давление на почву повышается на 20-25 кПа в зоне эксплуатационных нагрузок.

Определено, что в отличие от порожних в заполненных балластной жидкостью шинах максимальное давление на почву остается практически постоянным при нагрузках 75-100% от допустимых при заполнении на 75% и 50-100% - при заполнении на 40%. При меньших нагрузках максимальное давление на почву в балластированных жидкостью шинах в отличие от порожних не снижается, а, наоборот, стремительно растет.

**Ключевые слова:** тракторная шина, балластировка шин жидкостью, жесткость шины, радиальная нагрузка на шину, давление воздуха в шине.

## **Abstract**

### **ANALYSIS OF THE MAXIMUM SOIL PRESSURE OF TRACTOR AGRICULTURAL TIRES WITH LIQUID FILLING**

**O. Rebrov**

*The article offers an analysis of the maximum soil pressure of tractor tires when they are ballasted with liquid, since this method of increasing the tractor's coupling weight is significantly different from the traditional installation of ballast cast iron weights in terms of tire-soil interaction. Two options are considered: single tire ballasting at 75% fill volume and dual tire ballasting at 40% fill volume. Increasing of the maximum pressure on the soil and the peculiarities of forming the rigidity characteristics of the empty and filled with liquid*

ballast tires are established. It is shown that the maximum soil pressure increases by 40-45 kPa when filling the tire by 75% volume and by 20-25 kPa when filling the tire by 40% volume.

*In order to determine the maximum tractor tire pressure on the soil, the components of the tire deformation work are considered. The necessary work on static deformation of the tire cell, compression of the air and deformation of the tire tread were determined according to which analytical dependences to determine the components of the stiffness of the tire were obtained. The tire model is presented in the form of a serial-parallel connection of elastic elements with rigidity, which corresponds to the elasticity of the tire cell, tread and compressed air. The change of the components of the rigidity of the tire depending on the internal pressure and radial load is considered.*

*For tires filled with liquid, the component of rigidity corresponding to compression of the air changes, since the volume fraction caused by the radial deflection of the tire respect to the volume filled with air changes significantly. This causes the tires to be filled with 75% of the internal volume. For tires filled by 40% the change in stiffness is insignificant.*

*It is established that the maximum soil pressure of a 75% filled tire increases by 40-45kPa in the area of operational loads, and with a possible reduction of pressure by 0.1 bar - by 30-35 kPa. When filled with 40% of the volume, which recommended for dual tires, the maximum soil pressure in the load area increases by 20-25 kPa.*

*It is determined that, unlike the tires filled with the ballast liquid, the maximum soil pressure remains almost constant at loads of 75-100% of the allowable at filling by 75% and 50-100% at filling at 40%. At lower loads, the maximum pressure on the soil in the liquid-ballasted tire, unlike empty tires, does not decrease, but, on the contrary, increases rapidly.*

*Keywords: tractor tire, tire liquid ballasting, tire stiffness, radial tire load, tire air pressure.*