

УДК 631.37:633.85

№ держреєстрації 0121U109978

Інв. №: 01-2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

Юридична адреса:

72310, м. Мелітополь, пр. Богдана Хмельницького, 18; тел. (0619) 42 06 18

Фактична адреса:

69600, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66; тел. +38 099 6148302

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Таврійського державного
агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного,
докт. техн. наук, професор

_____ Сергій КЮРЧЕВ


«___» _____ 2023 р.

ЗВІТ

про науково-дослідну роботу
(проміжний)

**Програма: Розроблення технологічного регламенту вирощування
сільськогосподарських культур з використанням
елементів колійної системи землеробства**

Завідувач лабораторії,
д-р техн. наук


_____ В.Т. Надикто
«___» _____ 2023 р.

2023

Результати роботи розглянуто НТР НДІ МЗПУ,
протокол № ___ від «___» грудня 2023 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник теми і
відповідальний виконавець -
доктор технічних наук



В.Надикто
(вступ, розділи 1, 2, 3, 4,
висновки)

Відповідальний виконавець
доктор технічних наук

В.Кюрчев
(розділи 2, 3, 4)

кандидат технічних наук

Т. Чорна
(участь у 2, 4)

кандидат технічних наук

Є. Ігнат'єв
(участь у 4)

кандидат технічних наук

В. Мітков
(участь у 4)

провідний інженер

Т. Рева
(участь у 4)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 18 с., 6 рис., 1 табл., 23 джерела.

Об'єкт досліджень: процес прокладання слідів постійної технологічної колії (ПТК) колесами енергетичного засобу.

Мета роботи: забезпечення заданої глибини слідів ПТК шляхом раціонального поєднання конструктивних параметрів трактора з щільністю і твердістю оброблюваного ґрунтового середовища.

Методи досліджень.

Теоретичні дослідження проводили із застосуванням теорії подібності. Експериментальні дослідження здійснювали згідно з методикою проведення повного факторного експерименту за схемою 2^2 (два фактори на двох рівнях). Оброблення дослідних даних здійснювали на ЕОМ із застосуванням математичної статистики та регресійного аналізу.

В результаті проведених досліджень:

- виведено аналітичне рівняння, яке пов'язує конструктивні параметри трактора та параметри ґрунту з процесом формування у останньому колії заданої глибини;
- проаналізовано вплив конструктивних параметрів трактора та щільності і твердості ґрунту на глибину прокладання слідів постійної технологічної колії (ПТК).

ПОСТІЙНА ТЕХНОЛОГІЧНА КОЛІЯ (ПТК), СЛІД ПТК, ГЛИБИНА СЛІДУ ПТК, ВЕРТИКАЛЬНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ТИСК ПОВІТРЯ В ШИНІ, ЩІЛЬНІСТЬ ГРУНТУ, ТВЕРДІСТЬ ГРУНТУ

ВСТУП.....	5
1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	6
2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ.....	6
3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	8
4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	9
5 УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	15
ВИСНОВКИ.....	16
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	17

Для того, щоб найефективніше використовувати потенційні можливості навколишньої агроєкосистеми, кожна технологія повинна передбачати так зване розширене відтворення основних засобів. Перш за все цього потребує основа нашого землеробства – родючість ґрунтів.

Нині проблема її зниження із-за значного переущільнення рушіями енергетичних засобів та с.-г. машин набула глобального характеру. Спроби вирішення проблеми завдяки застосуванню шин низького тиску, здвоєних і навіть строєних коліс, зменшення кількості проходів машинно-тракторних агрегатів по полю тощо, дають лише частковий ефект.

Головна причина полягає в тому, що існуючі технічні та технологічні рішення не розв'язують головного протиріччя системи **"рушій - ґрунт"**. Суть його полягає у тому, що для досягнення високих тягово-зчіпних властивостей енергетичного засобу рушії останнього повинні контактувати з сухим і ущільненим ґрунтом, а для нормального росту культурних рослин потрібне оптимально вологе і пухке середовище.

Поєднання таких альтернативних вимог можливе тільки в тому випадку, коли зона росту с.-г. культур і колія рушіїв енергетичних засобів будуть чітко розмежовані. Рух останніх стає суворо регульованим (маршрутизованим) і передбачається він виключно по заздалегідь сформованим доріжкам - так званим постійним технологічним коліям (ПТК). Робоча ширина захвату використовуємих при цьому знарядь кратна крокові прокладених колій.

Першою операцією нової технології є прокладання слідів ПТК. Роботу призначеного для цього МТА можна вважати задовільною, якщо статистичні оцінки прямолінійності слідів ПТК не гірші за показники прямолінійності рядків, а оцінки відстані між суміжними слідами колії – не гірші показників стабільності міжрядь сходів просяної культури. А ці вимоги можуть бути дотримані тільки після обґрунтування схеми і параметрів агрегату для прокладання слідів ПТК. Для задовільного їх відслідковування водієм машинно-тракторного агрегату вони (сліди) повинні мати відповідну глибину. Задане значення останньої можна забезпечити лише за умову знань закономірностей зв'язків конструктивних параметрів трактора з такими характеристиками ґрунту, як щільність і твердість.

1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

Визначення впливу параметрів трактора і ґрунту на формування глибини слідів постійної технологічної колії

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

Одним із способів отримання такої функціональної залежності є використання критеріїв теорії подібності. Останній дуже широко використовується дослідниками (Kasprzak et al., 1990; Moifar and Shahgholi, 2018; Srivastava et al., 2012; Tarhan and Carman, 2004). Використовуючи основні положення роботи (Sonin, 2001), нами розроблено такий алгоритм розв'язання цієї задачі:

1) визначення параметрів (змінних) конструкції колісного трактора та фізико-механічних характеристик ґрунту, які суттєво впливають на процес формування постійних технологічних колій (ПТЛ);

2) складання матриці розмірності j вибраних параметрів;

3) визначення k незалежних параметрів;

4) представлення досліджуваного процесу в критеріальній формі;

5) складання виразів для j -к критеріїв подібності;

6) визначення типу критеріального рівняння регресії;

7) підготовка даних для повного факторного експерименту.

Згідно з нашим завданням вибрані параметри повинні бути взаємно незалежними і керованими. До них відносяться:

- вертикальне навантаження на колесо (N_w, H);

- тиск повітря в шині колеса (P_w, P_a);

- твердість ґрунту (N, P_a);

- щільність ґрунту ($\rho, \text{кгж}^{-3}$).

Враховуючи, що деформація ґрунту обумовлює зміщення її маси, вищевказані параметри були доповнені постійною характеристикою гравітаційного поля землі – прискоренням вільного падіння ($g, \text{мж}^{-2}$).

Функціональна залежність глибини доріжки ПТК (h) від наведених вище параметрів наступна:

$$h = f(N_w; P_w; H; \rho; g). \quad (1)$$

За базові параметри прийнято ті, які є взаємно незалежними. До таких відносяться P_w, ρ і g . По відношенню до основних одиниць системи [кг], [м] і [с] розмірність кожного із параметрів вразу (1) є такою:

$$\begin{aligned} P_w &= [\text{кг}^1] \quad [\text{м}^{-1}] \quad [\text{с}^{-2}] \\ \rho &= [\text{кг}^1] \quad [\text{м}^{-3}] \quad [\text{с}^0] \\ g &= [\text{кг}^0] \quad [\text{м}^1] \quad [\text{с}^{-2}] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} h &= [\text{кг}^0] \quad [\text{м}^1] \quad [\text{с}^0] \\ N_w &= [\text{кг}^1] \quad [\text{м}^1] \quad [\text{с}^{-2}] \\ H &= [\text{кг}^1] \quad [\text{м}^{-1}] \quad [\text{с}^{-2}] \end{aligned} \quad (3)$$

Для перевірки вибору основних параметрів досить розглянути матрицю їх розмірностей:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 1 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \end{vmatrix} = 2$$

Оскільки визначник D цієї матриці не дорівнює нулю, то параметри P_w , ρ і g дійсно взаємно незалежні. Критерії подібності системи (1) при цьому мають вид:

$$\pi_0 = \frac{h}{P_w^{A_0} \cdot \rho^{B_0} \cdot g^{C_0}}; \quad (4)$$

$$\pi_1 = \frac{H}{P_w^{A_1} \cdot \rho^{B_1} \cdot g^{C_1}}; \quad (5)$$

$$\pi_2 = \frac{N_w}{P_w^{A_2} \cdot \rho^{B_2} \cdot g^{C_2}}; \quad (6)$$

Щоб знайти коефіцієнт A_0 , у матриці визначника D перший рядок слід замінити розмірністю h , взятою з матриці (3), тобто $[0; 1; 0]$. Потім значення нового визначника слід поділити на значення визначника D . В результаті отримаємо:

$$A_0 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 1 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \end{vmatrix} \cdot D^{-1} = 1.$$

Аналогічно знаходимо значення коефіцієнтів B_0 і C_0 . У даному випадку вони дорівнюють: $B_0 = -1$; $C_0 = -1$. З урахуванням цього вираз (4) прийме вид:

$$\pi_0 = h\rho g/P_w. \quad (7)$$

Аналогічним чином знаходимо значення коефіцієнтів A_1 , B_1 , C_1 та A_2 , B_2 , C_2 . У підсумку це дає можливість вирази (5) і (6) записати так:

$$\pi_1 = H/P_w. \quad (8)$$

$$\pi_2 = N_w \rho^2 g^2 / P_w^3. \quad (9)$$

Згідно з другою π -теоремою

$$\pi_0 = f(\pi_1; \pi_2).$$

або з урахуванням виразу (7):

$$h\rho g/P_w = f(\pi_1; \pi_2). \quad (10)$$

3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для побудови математичної моделі досліджуваного процесу використовували відомий метод планування повнофакторного експерименту за схемою 2^2 (тобто 2 фактори на 2 рівнях значущості). Факторами виступали π_1 і π_2 . Матриця планування експерименту надана у таблиці 1.

Таблиця 1. Рівні і інтервали варіювання Пі-параметрів

Параметр	Рівень варіювання			
P_w (Па)	100000-160000			
ρ (кг \cdot м $^{-3}$)	1020-1260			
H (Па)	480000-900000			
N_w (Н)	8100-10100			
Пі-параметр	Рівень варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
π_1	3	6	9	3
π_2	0,0002	0,00085	0,0015	0,00065

Відомо, що основна ущільнювальна дія на ґрунт здійснюється колесами передньої осі енергетичного засобу. У якості такого у експериментальних дослідженнях використовували трактор МТЗ-1221.2.

Коротка технічна характеристика трактора

Потужність двигуна, кВт	95.6
Експлуатаційна вага, кН	54.6
Передні колеса	420/70R24
Задні колеса	18.4R38
Сила ваги на передніх колесах, кН	16.2

Глибину сліду, залишену переднім колесом цього трактора, вимірювали двічі з похибкою 0,5 см. Вимірювання проводили в центрі колії колеса. Кількість вимірювань - 100, крок вимірювання - 10 см.

Відповідно до виразу (8), нижній рівень (-1, таблиця 1) параметру π_1 буде забезпечений мінімальним значенням параметра H і максимальним значенням параметра P_w . При максимальному значенні H і мінімальному значенні P_w отримаємо верхній рівень (+1) параметра (фактора) π_1 .

Нижній рівень (-1) фактору π_2 можна отримати, як показує аналіз формули (9), з мінімальним значенням параметрів N і ρ і максимальним значенням параметра P_w .

Якщо параметри N і ρ мають максимальні значення, а P_w - мінімальний, то отримаємо верхній (+1) рівень значення параметра π_2 .

Мінімальні і максимальні значення параметрів H і ρ задавали наступним чином. Спочатку вибрали початковий агротехнічний фон. Це було весняне поле, на якому попередньою осінню у вересні зробили безполицеве розпушення стерні озимої пшениці на глибину 25 см. Навесні на цьому полі виділили чотири ділянки розміром 10x30 м кожній. З метою забезпечення дворазового повторення експериментів трактор на кожній ділянці на одній і тій же передачі рухався у прямому і зворотному напрямках. Щільність ґрунту (ρ) і твердість (H) кожної ділянки, виміряні навесні (березень) до експерименту, були прийняті за максимальні. Потім дві ділянки поля обробили дисковою бороною на глибину до 15 см. Щільність ґрунту (ρ) і твердість (H) цих ділянок були прийняті як мінімальні.

Твердість ґрунту вимірювали пенетрометром «Лан-М», який має діапазон вимірювань 0-7,8 мПа з похибкою $\pm 0,05$ мПа. Методика виміру щільності ґрунту викладена у (Nadykto and Kotov, 2015). Вологість ґрунту визначали загальновідомим термостатно ваговим методом. Для контролю зміни тиску повітря в шинах трактора P_w використовували манометр моделі RT-0500 з інтервалом вимірювання ± 10 кПа. Зміну вертикального навантаження на передньому мосту трактора реалізовували з допомогою металевих вантажів, масою 50 кг. Оброблення даних планування експерименту здійснювали за методикою, викладеною у (Jeff Wu and Hamada, 2011).

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ефективність застосування ПТК (або Controlled Traffic Farming – CTF) у сільськогосподарському виробництві давно доведена і не викликає сумнівів (Antille et al., 2019; Chamen, 2015; Raper, 2005; Tullberg, 2000). З моменту свого створення були сформульовані основні вимоги до цієї системи. Однією із них є точний рух машинно-тракторних агрегатів (МТА) по слідах ПТК. Для цього рекомендується оснастити обладнання досить дорогою системою GNSS RTK (Alvemar et al., 2017; Celades-Martinez, Jorge A. et al., 2020; Nygard, 2018). Більше того, точність і надійність роботи цієї системи залежить від погодних умов ті рельєфу місцевості (Dussault et al., 2001; Hellström, 2002). Певний вплив на ефективність функціонування системи GNSS RTK здійснює схема машинно-тракторного агрегату (Gan-Mor et al., 2007).

Існуючі системи ПТК в основному використовуються на одному полі. Попри це, цікавим є використання ПТК у відповідній сівоzmіні протягом багатьох років. В Україні є перспективним такий її варіант:

«соняшник» – «пар» – «озима пшениця».

Для реалізації ПТК у такій сівоzmіні бажано, щоб її сліди були добре помітні, а значить і досить глибокі. Інакше після першого року використання вони можуть стати практично загорнутими ґрунтом (тобто невидимими).

Для розв'язання цієї проблеми розробили спеціальний машинно-тракторний агрегат, детально описаний в роботі (Булгаков та ін., 2021). У цьому МТА використовується спеціальна передня машина, оснащена двома корпусами плуга, розташованими по колії передніх коліс трактора.

Водночас, виникає питання: чи можна сформувати сліди ПТК заданої глибини без застосування спеціальної машини? Глибина слідів ПТК (h) залежить від деяких параметрів трактора та ґрунту. Цілком очевидно, що чим більше значення параметра h , тим більше ущільнення останнього (ґрунту). Нині досліджено вплив багатьох параметрів конструкції трактора на цей процес. Так у роботі (Battiatto and Diserens, 2013), наприклад, оцінено ущільнення ґрунту у залежності від тиску повітря в шині і вертикального навантаження на неї. При вивченні цієї проблеми деформаційну здатність ґрунту запропоновано оцінювати спеціальним індексом Field Compaction Capacity – FCC (Priekner et al., 2017). Ущільнювальний вплив типу ходової системи трактора розглянуто у роботі (Ansorge and Godwin, 2008). Додатково до цього вивчена ефективність зміни тиску повітря у подвоєних шинах тягового засобу (Keller and Arvidsson, 2004).

Обмеженість застосування баластування трактора з урахуванням його впливу на ущільнення ґрунту розкрита у роботі (Vulgakov et al., 2019). У ній, зокрема, приводиться рівняння для визначення глибини колії (H_z) після проходження коліс трактора:

$$H_z = \frac{N_{ek}}{\pi \cdot \rho_w} \cdot \sqrt{D \cdot B}.$$

Але вона включає лише конструктивні параметри трактора, а саме: N_{ek} – вертикальне навантаження на колесо; ρ_w – тиск повітря в шині; D , B – діаметр і ширина колеса відповідно. Параметри ґрунту у це рівняння, як бачимо, не входять. Водночас, для прокладання слідів ПТК заданої глибини необхідно володіти інформацією про комплексний вплив на неї як параметрів трактора, так і ґрунту. Для останнього найважливішими є щільність і твердість. На даний момент така інформація вкрай обмежена, що і є підставою для проведення даних досліджень.

Експериментальні дослідження проводили темно-каштановому чорноземі з вмістом гумусу до 4,5%. До досліджень вміст вологи в шарі 0-15 см становив 20,9%, твердість 0,90 мПа і щільність 1,26 г/см³. Після розпушування твердість ґрунту в шарі 0-15 см знизилася до 0,48 мПа і щільність до 1,02 г/см³. При обробці отриманих експериментальних даних встановлено, що функціональна залежність (10) може бути апроксимована лінійним багаточленом:

$$h_{pg}/P_w = 0.01 - 0.001\pi_1 + 3.7\pi_2. \quad (11)$$

З урахуванням виразів (8) і (9) залежність (11) трансформується до виду:

$$h = 0.01P_w/(\rho g) - 0.001H/(\rho g) + 3.7N_w\rho g/P_w^2. \quad (12)$$

Аналіз виразу (12) показує, що зі збільшенням тиску повітря в передніх шинах трактора глибина колії збільшується (рис. 1). У принципі це здійснюється за лінійним законом, хоча в межах $P_w = 0.10 - 0.16$ мПа функціональна залежність $h = f(P_w)$ близька до прямої лінії.

Зі збільшенням вертикального навантаження на колесо параметр h змінюється прямопропорційно і проходить за законом прямої лінії (рис. 2).

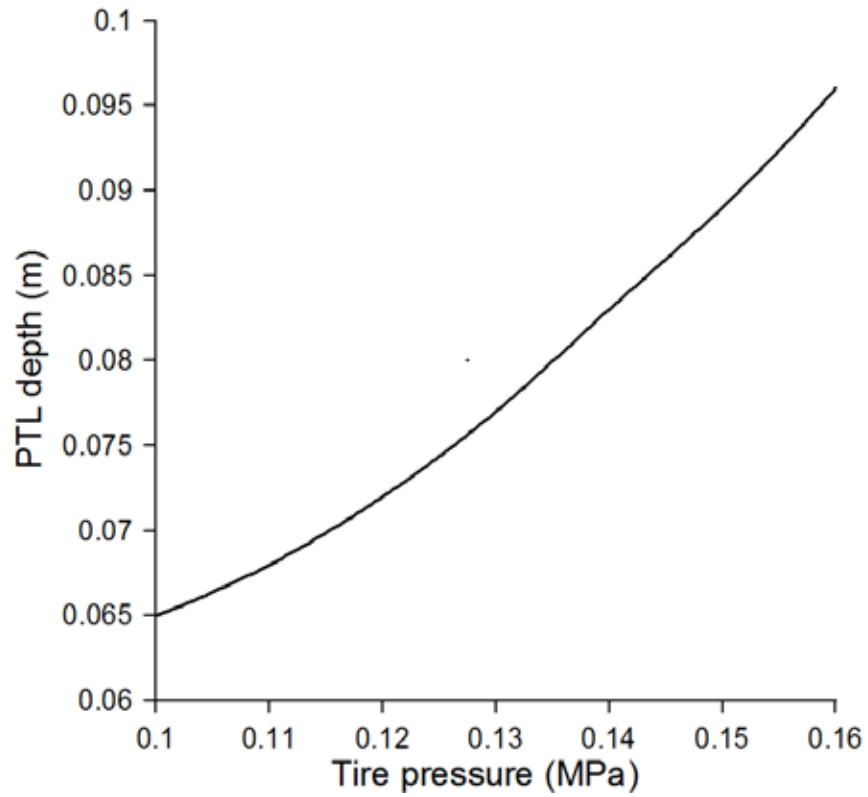


Рис. 1. Залежність глибини сліду ПТК (h)
Від тиску повітря в шині колеса трактора (P_w)

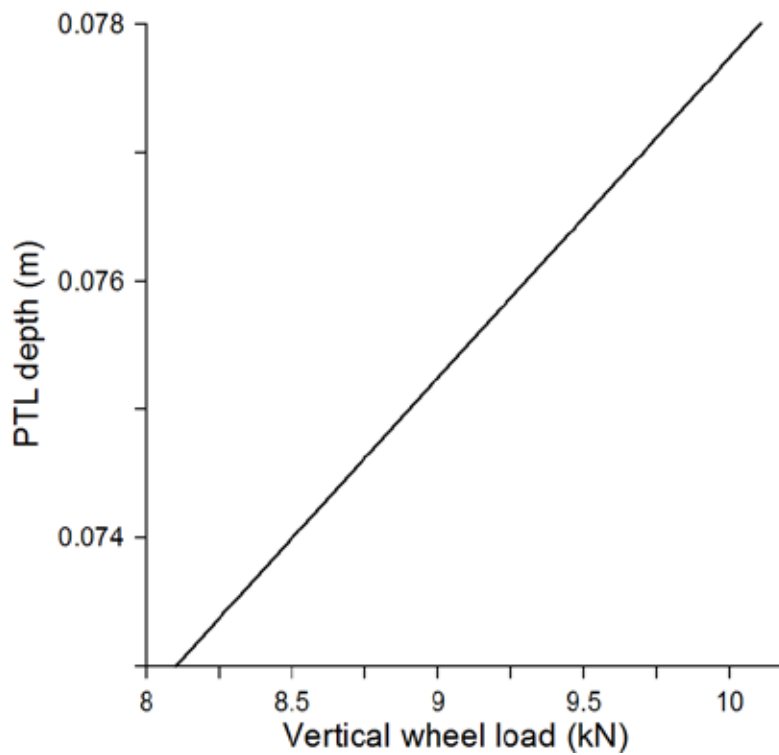


Рис.2. Залежність глибини сліду ПТК (h)
від вертикального навантаження на колесо трактора (N_w)

Зі збільшенням щільності ґрунту глибина колії ПТК зменшується (рис. 3). Такий же результат має місце за підвищення твердості ґрунту (рис. 4).

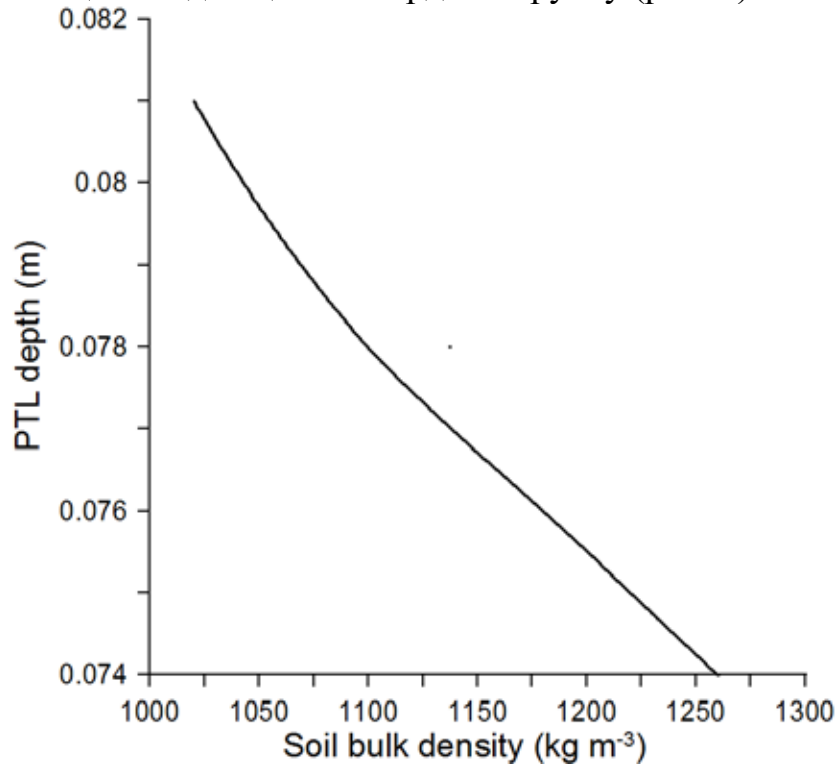


Рис. 3. Залежність глибини сліду ПТК (h) від щільності ґрунту ρ)

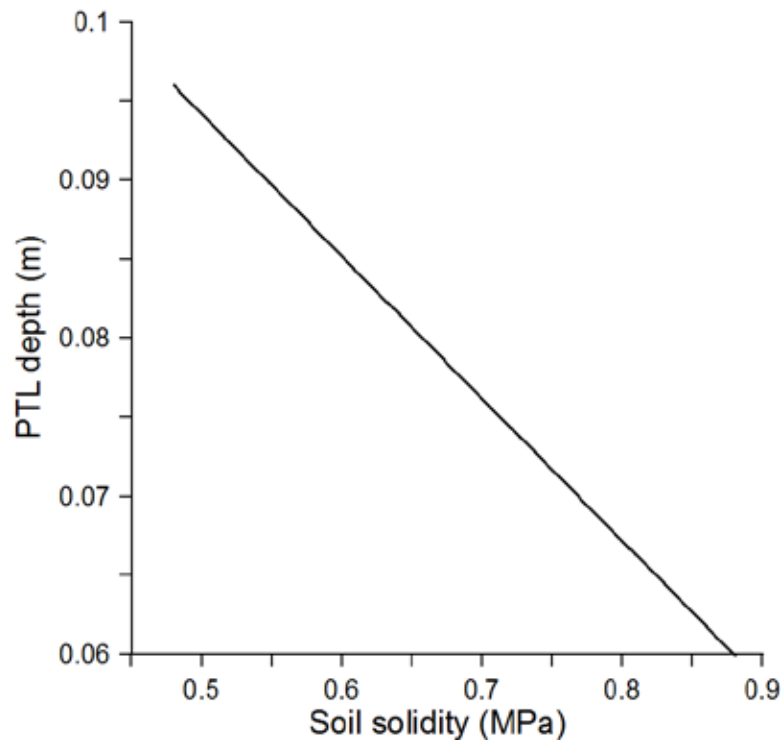


Рис. 4. Залежність глибини сліду ПТК (h) від твердості ґрунту (H)

За науковою логікою закономірності, наведені на рис. 1-4, цілком закономірні і зрозумілі. У якісному вираженні вплив параметрів P_w , N_w , ρ і H на величину h дослідникам відомий. Цікавим є кількісний вплив. При цьому не окремий, а спільний, тобто комплексний. Як показано в таблиці 1, параметри P_w , N_w , ρ і H мали різні межі зміни. Теоретично тиск повітря в шині P_w змінювали від 0,10 до 0,16 мПа, тобто збільшували на 60%. Твердість ґрунту H зросла ще більше: з 0,48 до 0,90 мПа, тобто на 88%. За щільністю ґрунту та вертикальним навантаженням на колесо трактора зміни були майже однаковими і приблизно становили 25%.

Виходячи з цього, спробуємо оцінити ступінь зміни глибини слідів ПТК за умови збільшення параметрів P_w , N_w , ρ і H на ту ж величину – на 25%. Більше значення цього показника немає сенсу приймати через параметри N_w і H , оскільки їх значення в процесі вивчення математичної моделі (12) збільшилися не більше ніж на 25%.

Аналіз результатів розв'язку рівняння (12) за таких обмежень показує, що найбільший вклад у зміну параметра h здійснює твердість ґрунту H (рис. 5). У даному випадку цей вклад становить 24,0%.

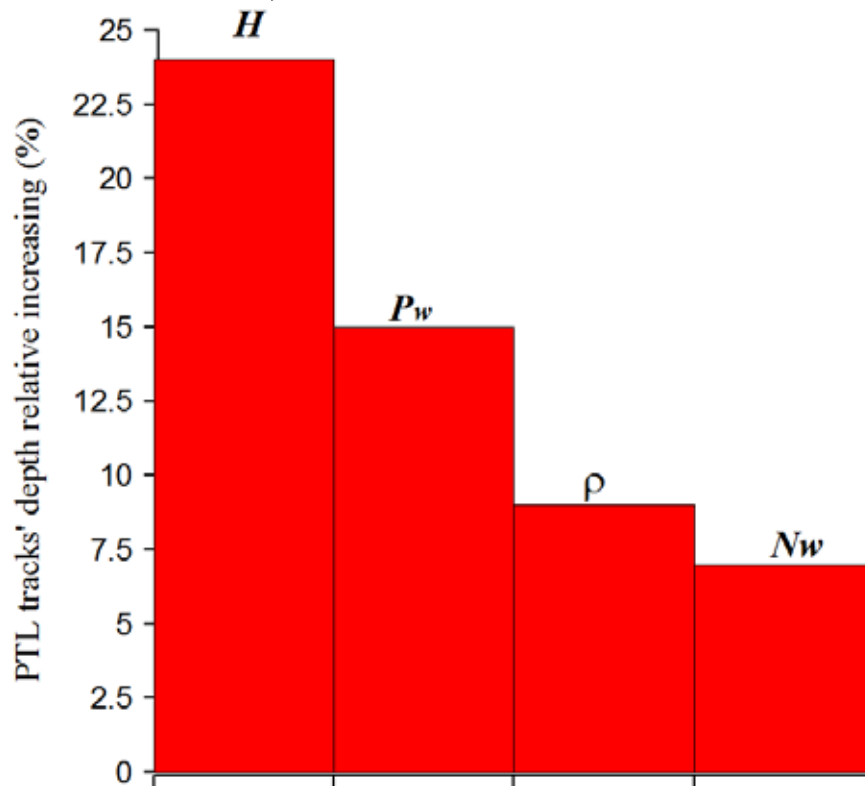


Рис. 5. Ступінь впливу на глибину слідів ПТК параметрів P_w , N_w , ρ і H за зміни їх значень на 25%

Внесок тиску повітря в шині в зміну глибини сліду ПТК менший і становить 15%. Щільність ґрунту і вертикальне навантаження на колесо мають приблизно однаковий вплив на зміну параметра h – 9 і 7% відповідно. З цього аналізу випливає, що для формування слідів ПТК прийнятної (заданої) глибини, основний фон ґрунту повинен бути низької твердості.

Менший ступінь впливу параметра ρ на глибину ПТК (h) можна пояснити наступним. Хоча між щільністю і твердістю ґрунту існують пряма кореляція, але вона не є прямо пропорційною. За даними наших досліджень майже 300 проб ґрунту вологістю 12-20% зменшення її твердості на 0.5 мПа приводило до зменшення щільності лише на 0.05-0.08 г/см³. Приблизно такі ж результати отримано у роботі (Rusanov, 1998). У принципі за відносно низької вологості ґрунт, маючи високу шпаруватість, може характеризуватися низькою щільністю, але досить значною твердістю.

Попри все, зменшення щільності ґрунту є бажаною умовою для отримання такої глибини слідів ПТК, яка буде забезпечувати досить хорошу їх видимість без застосування системи GPS.

Визначення координат (X ; Y) машинно-тракторного агрегату на полі (рис. 6) у цьому випадку легко визначити із виразу:

$$X = \frac{S \cdot (2n - 1)}{2}; Y,$$

де S – крок ПТК, м; n – номер ПТК, на якій розташований МТА.

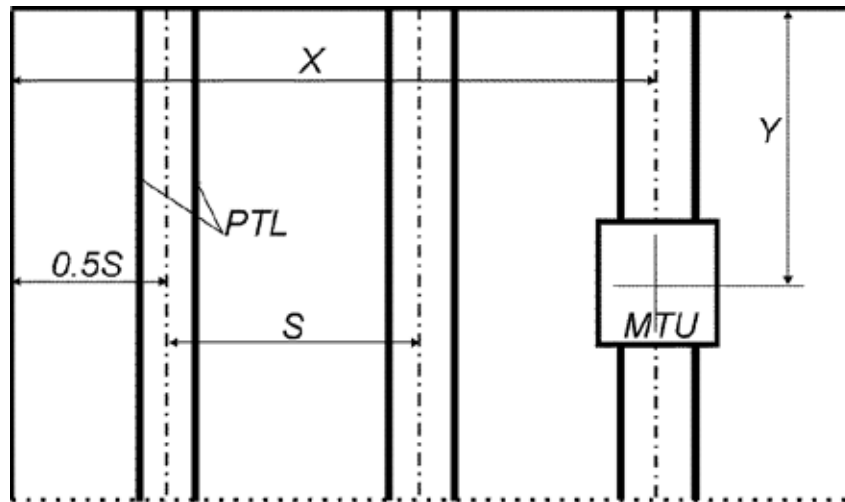


Рис. 6. Схема для визначення координат МТА на полі зі слідами ПТК

Для визначення координати Y достатньо обладнати трактор простим датчиком переміщення. Найпростішим із них є магнітний енкодер, що працює за принципом датчика Холла.

Ще одним напрямком застосування колійної системи землеробства є технологія вирощування сільськогосподарських культур за схемою «strip-till». Першою чергою це стосується просапних, посіяних з найбільш розповсюдженими міжряддями 70 см (соняшник, кукурудза, соя, рицина тощо). У цьому випадку колісний енергетичний засіб переміщується по слідах постійної технологічної колії. Проте, під час прокладання останніх обробіток ґрунту здійснюється не суцільним фронтом, а смугами, ширина яких становить приблизно половину ширини міжряддя. Лише в ці оброблені смуги і здійснюється сівба просапних культур.

5 УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Першою чергою колійна система використовується нами в технологіях вирощування просапних культур з кроком ПТК, який дорівнює 8,4 м. Як уже підкреслювалося вище, одним із технологічних елементів застосування постійної технологічної колії є її поєднання з «strip-till» технологією.

У звітному році поза програмою цих досліджень були проведені теоретичні та експериментальні дослідження асиметричного посівного машинно-тракторного агрегату на базі трактора серії ХТЗ-160 та 12-рядної просапної сівалки з міжряддями 70 см Leda-12 (Evvorti, Кропивницький).

Окрім того на базі трактору цієї ж серії був розроблений агрегат для реалізації вирощування просапних культур за технологією «strip-till». У процесі експериментальних досліджень ці агрегати здійснювали рух по ПТК, прокладених з урахуванням тих рекомендацій, які викладені у даному звіті.

Частина отриманих при цьому результатів досліджень опублікована у наступних роботах:

1. Булгаков В.М., Адамчук В.В., Надикто В.Т., Троханяк О.М, Чорна Т.С. Теоретичне дослідження стійкості руху асиметричного посівного машинно-тракторного агрегату. Вісник аграрної науки, 2023. №5. С. 57-64.
2. Булгаков В.М., Адамчук В.В., Надикто В.Т., Кюрчев В.М., Троханяк О.М. Експериментальні дослідження траєкторії руху асиметричного посівного машинно-тракторного агрегату. Вісник аграрної науки, 2023. №6. С. 48-54.
3. Булгаков В.М., Надикто В.Т. Дослідження стійкості горизонтального руху асиметричного посівного машинно-тракторного агрегату. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання». К.: НУБіП України, 2023. 610 с.
4. Bulgakov V., Adamchuk V., Nadykto V., Ivanovs S., Kyurchev V., Yaremenko V., Krasiuk L. Treatment quality assessment of sunflower inter-row widths with asymmetric joining of cultivator to tractor. Engineering for Rural Development, Jelgava, 24.-26.05.2023. P. 834-841 (**Scopus**).
5. Nadykto V., Domeika R., Golub G., Kukharets S., Chorna T., Cesna J., Hutsol T. Research on a Machine-Tractor Unit for Strip-Till Technology. AgriEngineering, 2023. V.5. Pp. 2184-2195 (**Scopus**).

ВИСНОВКИ

1. Отримано аналітичну залежність, яка відтворює залежність глибини прокладання слідів постійної технологічної колії як від конструктивних параметрів трактора, так і від таких характеристик ґрунту, як його щільність і твердість.
2. Для отримання більшої глибини (h) слідів постійної технологічної колії (ПТК) агротехнічний фон першою чергою повинен мати низьку твердість ґрунту. Більш низька її щільність при цьому теж важлива, але її вплив на параметр h менший, ніж твердість.
3. Другим кроком у отриманні більшої глибини слідів ПТК є підвищення тиску повітря в шинах коліс трактора. Баластування коліс для вирішення цієї проблеми найменш ефективно, оскільки збільшення вертикального навантаження на них здійснює найменший вплив на величину параметра h .
4. Викладені у даному звіті результати використані при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень машинно-тракторних агрегатів для вирощування просапних культур із застосуванням ПТК, прокладених з кроком 8,4 м. У томі числі і при використанні технології «strip-till».

- Alvemar, H., Andersson, H., Henrik Pedersen, H., 2017. Profitability of Controlled Traffic in Grass Silage Production, in: *Progress in Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. pp. 147–167.
- Ansorge, D., Godwin, R.J., 2008. The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction-Part 2: Multi-axle machine studies. *Biosyst. Eng.* 99, 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.11.014>
- Antille, D.L., Peets, S., Galambošová, J., Botta, G.F., Rataj, V., Macak, M., Tullberg, J.N., Chamen, W.C.T., White, D.R., Misiewicz, P.A., Hargreaves, P.R., Bienvenido, J.F., Godwin, R.J., 2019. Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agron. Res.* 17, 653–682. <https://doi.org/10.15159/AR.19.133>
- Battiato, A., Diserens, E., 2013. Influence of Tyre Inflation Pressure and Wheel Load on the Traction Performance of a 65 kW MFWD Tractor on a Cohesive Soil. *J. Agric. Sci.* 5, 197–215. <https://doi.org/10.5539/jas.v5n8p197>
- Bulgakov, V., Nadykto, V., Kyurchev, S., Nesvidomin, V., Ivanovs, S., Olt, J., 2019. Theoretical background for increasing grip properties of wheeled tractors based on their rational ballasting. *Agraart. J. Agric. Sci.* 30, 78–84. <https://doi.org/10.15159/jas.19.07>
- Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Nadykto, V., Ivanovs, S., Adamchuk, V., 2021. Experimental study of the implement-and-tractor aggregate used for laying tracks of permanent traffic lanes inside controlled traffic farming systems. *Soil Tillage Res.* 208, 104895. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104895>
- Celades-Martinez, Jorge A., Vasco-Gutierrez, D.F., Ramos-Goyes, M.A., Castro-Franco, M., 2020. A technique to evaluate field traffic patterns of sugarcane harvester using Autopilot System, in: *2020 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*. pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/COLCOM50121.2020.9219758>
- Chamen, T., 2015. Controlled traffic farming - From worldwide research to adoption in Europe and its future prospects. *Acta Technol. Agric.* 18, 64–73. <https://doi.org/10.1515/ata-2015-0014>
- Dussault, C., Courtois, R., Ouellet, J.-P., Huot, J., 2001. Influence of Satellite Geometry and Differential Correction on GPS Location Accuracy. *Wildl. Soc. Bull.* 29, 171–179.
- Gan-Mor, S., Clark, R.L., Upchurch, B.L., 2007. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Comput. Electron. Agric.* 59, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.04.008>
- Hellström, T., 2002. *Autonomous Navigation for Forest Machines*.
- Jeff Wu, C.F., Hamada, M.S., 2011. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*. John Wiley & Sons.
- Kasprzak, W., Lysik, B., Rybacruk, M., 1990. *Dimensional Analysis in the Identification*

- of Mathematical Models. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.
- Keller, T., Arvidsson, J., 2004. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil Tillage Res.* 79, 191–205.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.008>
- Moinfar, A.M., Shahgholi, G., 2018. Dimensional Analysis of the Tractor Tractive Efficiency Parameters. *Acta Technol. Agric.* 21, 94–99. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0017>
- Nadykto, V., Kotov, O., 2015. Method for determining soil bulk density (in Ukrainian: Sposib viznachennya shchilnosti gruntu). UA 97828, G 01N 1/00.
- Nygaard, M. et al., 2018. Farmers' perception of Controlled Traffic Farming (CTF) and associated technologies.
- Prikner, P., Kotek, M., Jindra, P., Pražan, R., 2017. Field compaction capacity of agricultural tyres. *Agron. Res.* 15, 806–816.
- Raper, R.L., 2005. Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramechanics* 42, 259–280.
<https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.010>
- Sonin, A.A., 2001. *The Physical Basis of Dimensional Analysis*. Department of Mechanical Engineering MIT Cambridge.
- Srivastava, A.K., Goering, C.E., Rohrbach, R.P., Buckmaster, D.R., 2012. *Engineering Principles of Agricultural Machines*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Tarhan, S., Carman, K., 2004. Modeling the torque and power requirements of traction tires of horicultural tractoes using dimensional analysis. *Math. Comput. Appl.* 9, 427–434.
- Tullberg, J.N., 2000. Wheel traffic effects on tillage draught. *J. Agric. Eng. Res.* 75, 375–382. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0516>