

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**ПОПРОЦЬКИЙ СЕРГІЙ ЛЕОНІДОВИЧ**

УДК 631.372: 631.3.06

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
АНАЛІЗ ТА ЗНИЖЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОЇ ДІЇ ХОДОВИХ СИСТЕМ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН НА ҐРУНТ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ С. Л. Попроцький

**Керівник роботи**

Заєць М. Л.

кандидат технічних наук, доцент

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Попроцький Сергій Леонідович. Аналіз та зниження ущільнюючої дії ходових систем сільськогосподарських машин на ґрунт. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В роботі розглянуто питання та заходи по зниженню ущільнюючою дії ходових систем сільськогосподарських машин на ґрунт до екологічнобезпечного рівня шляхом обґрунтування величини питомого тиску з боку колісних та гусеничних рушіїв машинно-тракторних агрегатів (МТА). Представлена робота включає теоретичні, практичні дослідження дії ходових систем МТА на поверхню ґрунту взаємодії в залежності від типу рушіїв та їхніх експлуатаційних параметрів.

В магістерській роботі висвітлено аналіз і розрахунок раціональних параметрів рушіїв МТА, показників, що оцінюють ущільнення ґрунту ходовими системами тракторів та с.-г. машин, допустимого рівня ущільнення ґрунту. Удосконалено модель взаємодії ходових систем МТА з ґрунтом та представлено залежності впливу їх параметрів на поверхню поля.

Виконано порівняльну характеристику впливу швидкості руху ходових систем машин на ущільнення ґрунту. Описано основні методи і способи зниження ущільнюючої дії на поверхню ґрунту ходових систем МТА, вплив ширини захвату агрегату на ущільнюючу дію ґрунту.

*Ключові слова: ущільнення, питомий тиск, рушій, поверхня ґрунту, машинно-тракторний агрегат, ходова система, експлуатаційні параметри.*

## ANNOTATION

**Poprotsky Sergey. Analysis and reduction of sealing effect of running systems of agricultural machines on the soil.** - Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in 208 - Agricultural Engineering. - Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

The paper considers the issues and measures to reduce the sealing effect of the running systems of agricultural machinery on the ground to an environmentally friendly level by justifying the value of the specific pressure of the wheeled and tracked engines of machine-tractor units (MTU). The presented work includes theoretical, practical researches of action of running systems of MTU on a surface of soil of interaction depending on type of engines and their operational parameters.

The master's thesis covers the analysis and calculation of rational parameters of MTU engines, indicators that assess soil compaction by running systems of tractors and agricultural machinery. machines, the permissible level of soil compaction. The model of interaction of running systems of MTU with soil is improved and dependences of influence of their parameters on a field surface are presented.

The comparative characteristic of influence of speed of movement of running systems of cars on soil consolidation is executed. The main ways and means of reducing the sealing effect on the soil of mechanization, the influence of the width of the unit on the sealing effect of the soil are described.

*Key words: consolidation, specific pressure, propulsion, soil surface, machine-tractor unit, running system, operational parameters.*

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 5  |
| РОЗДІЛ 1   |    |
| АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТА ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ УЩІЛЬНЕННЯ<br>ГРУНТУ ТА ШЛЯХІВ ЗНИЖЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОЇ ДІЇ.....      | 8  |
| Висновки до розділу 1.....   | 11 |
| РОЗДІЛ 2   |    |
| ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ УЩІЛЬНЕННЯ ГРУНТУ ХОДОВИМИ<br>СИСТЕМАМИ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ.....           | 12 |
| 2.1. Показники ущільнення ґрунту ходовими рушіями МТА.....   | 12 |
| 2.2. Допустимий рівень ущільнення ґрунту за критерієм<br>урожайності с.-г. культур.....                  | 15 |
| 2.3. Взаємозв'язок ущільнюючої дії на ґрунт різними<br>видами ходових систем .....                       | 17 |
| Висновки до розділу 2.....   | 20 |
| РОЗДІЛ 3   |    |
| РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СПОСОБИ ЗМЕНШЕННЯ<br>УЩІЛЬНЮЮЧОЇ ДІЇ НА ГРУНТ ХОДОВИХ СИСТЕМ МТА.....           | 21 |
| 3.1. Результати визначення залежності питомого тиску<br>на ґрунт від величини робочої швидкості МТА..... | 22 |
| 3.2. Результати експериментальних досліджень по<br>визначенню твердості ґрунту.....                      | 24 |
| 3.3. Способи зменшення ущільнюючої дії на ґрунт МТА.....   | 29 |
| Висновки до розділу 3.....   | 32 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....   | 33 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....  | 34 |

## ВСТУП

В сучасних умовах енергонасиченості технологічних процесів виробництва сільськогосподарської продукції, основним критерієм, які висуваються до сільськогосподарських машин є підвищення їхньої продуктивності. Наслідками гонитви за підвищенням продуктивності МТА є збільшення маси машин, за рахунок габаритних розмірів, кількості функцій, які вони виконують це пов'язано також із зростанням необхідних тягово-швидкісних показників їх роботи. Всі ці фактори зумовлюють підвищення механічної ущільнюючої дії їхніх рушіїв на поверхню, що суттєво знижує родючість ґрунту, і як наслідок урожайність культур.

В процесі виконання технологічних операцій ходові системи машин рухаючись по одному і тому самому полю, загальна площа покрита рушіями в два рази перевищує площу поля, 10 – 12 % площі поля піддаються дії від 6 до 20 разів, 65 – 80 % - від 1 до 6 разів, 10 – 15 % площі не піддаються їх дії[1, с. 25.]. Як наслідок дії ходових систем тракторів, автомобілів, комбайнів і сільськогосподарських машин глибина ущільнення ґрунту досягає 0,3 – 0,6 м. Найбільш негативній дії ущільнення піддається верхній родючий шар ґрунту [2, с. 43.].

Взаємодія ходових систем та їх колісних рушіїв МТА з ґрунтом розглянуто не в повній мірі, не розраховано сумарну питому дію на поверхню поля від коліс і робочих органів машинних агрегатів і взаємозв'язок показників допустимого рівня ущільнюючої дії при застосуванні інтенсивних механізованих технологій вирощування культур[3, с. 2.]. Тому, обґрунтування раціональних схем ходових систем МТА та їх параметрів, що зменшують негативну дію переущільнення є досить актуальним інженерним завданням.

**Мета роботи.** Метою є зменшення негативної дії ходових систем машинно-тракторних агрегатів на ущільнення ґрунту, шляхом визначення раціональних параметрів і швидкісних режимів роботи енергетичних засобів.

Для досягнення мети потрібно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати основні методи і способи зниження ущільнюючої дії на ґрунт ходових систем та визначити головні фактори ущільнення ґрунту;
- дослідити вплив параметрів і конструкцій ходових систем МТА на показники їх ущільнюючої дії на ґрунт;
- визначити раціональні параметри і режими роботи ґрунтообробних агрегатів та вплив швидкості руху ходових систем на ущільнення ґрунту;
- визначити вплив буксування ходових систем тракторів на ущільнення ґрунту;
- надати рекомендації по зниженню негативної дії ходових систем МТА на поверхневий родючий шар ґрунту;

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес взаємодії ходових систем машинно-тракторних агрегатів з поверхнею ґрунту.

**Предмет дослідження** – залежність ущільнюючої дії рушіїв від параметрів і режимів роботи машинно-тракторних агрегатів.

**Методи дослідження.** Аналіз механіко-технологічних властивостей ґрунтів, конструкційно-технологічних параметрів рушіїв машинно-тракторних агрегатів проводився із застосуванням методів фізичного та числового імітаційного моделювання в землеробській механіці.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження:**

1. Заєць М. Л. Вплив на ущільнюючу дію параметрів колісного рушія / М. Л. Заєць, С. Л. Попроцький // Наукові читання–2020Б: науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики, 5-6 березня 2020 р. Житомир: ЖНАЕУ, 2020. С. 121-124.
2. Заєць М. Л. Вплив ущільнюючої дії на ґрунт параметрів гусеничного рушія / М. Л. Заєць, С. Л. Попроцький // Біоенергетичні системи: Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи».

Частина 2, 29 травня 2020 р. Житомир: Поліський національний університет, 2020. С. 138-143.

3. Заєць М. Л. Результати експериментальних досліджень повизначенню твердості ґрунту / М. Л. Заєць, С. Л. Попроцький // Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2020». 26 жовтня 2020 р. Житомир: Поліський національний університет, 2020. С. 142-146.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати дослідження використані при вдосконаленні ходових систем мобільної сільськогосподарської техніки. За результатами проведених розрахунків і моделювання процесів дії ущільнення рушіїв на ґрунт сформовано рекомендації щодо модернізації рушіїв енергетичних засобів та сільськогосподарських машин.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 21 найменування. Загальний обсяг роботи становить 36 сторінки комп'ютерного тексту, містить 2 таблиці та 16 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТА ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ ТА ШЛЯХІВ ЗНИЖЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОЇ ДІЇ

Ущільненість ґрунту залежить від багатьох факторів, в тому числі від засобів механізації і технологічних процесів, що визначаються рівнем розвитку системи землеробства і технічного досягнення. Головні фактори, що впливають на ущільнення ґрунту, наведені на рис. 1.1. [4, с. 12.].



Рис.1.1. Структура факторів, які впливають на ущільнення ґрунту

Опади у вигляді дощу ущільнюють ґрунт завдяки ударам капель, запливання, додаткової маси. Ущільнення ґрунту збільшується по мірі



збільшення кількості опадів. Гравітація – фактор, що впливає на ущільнення ґрунту по різному, так як залежить від вологи, складу ґрунту, температурних змін і т. ін.

Ходові системи засобів механізації в землеробстві мають різні конструктивні параметри, а тому ущільнюють ґрунт по різному. Гусеничні рушії менше ущільнюють ґрунт ніж колісні. Ходові системи тракторів у яких рушії мають менший крок, а опорні котки – меншу відстань між собою здатні в меншій мірі ущільнювати ґрунт.

Колісні ходові системи тракторів також мають різні конструктивні особливості і діють на ґрунт по-різному (спарені колеса, шини розширеного профілю, шини високого чи низького тиску тощо). Від конструкції рушіїв залежать питомі навантаження на ґрунт, деформація його при буксуванні, що впливає на ущільненість ґрунту. [4, с. 23.].

Склад МТА впливає на ущільнення ґрунту через масу, тип рушіїв, кількість опорних систем, робочу ширину захвату агрегату, швидкість руху.

Вид технологічної операції впливає на ущільнення ґрунту через склад агрегатів, ширину захвату, період її виконання та стан ґрунту, повторність проходів агрегатів тощо. Повторність технологічної операції безпосередньо впливає на ущільнення ґрунту завдяки кількості проходів опорних систем тракторів і с.-г. машин.

Типи робочих органів визначаються видами технологічних операцій і впливають на ґрунт по-різному завдяки властивостям їх конструкції.

Ущільнення ґрунту призводить до багатьох наслідків (рис.1.2), які в кінцевій формі впливають на зменшення родючості ґрунту і урожайності сільськогосподарських культур. Серед багатьох факторів ущільнення ґрунту в значній мірі проявляються ті, що залежать від ходових систем МТА. На погіршення фізико-механічних показників ґрунту найбільше впливають МТА з великою вагою не залежно від питомого тиску їх на ґрунт. Слідуючи з цього

з'являється задача «протиріччя-протиріч» по використанню агрегатів для проведення технологічних операцій, оскільки машино-тракторні агрегати з високою продуктивністю мають досить високу масу. [5, с. 123.]



Рис. 1.2. Структурна схема наслідків ущільнення ґрунту

Соціально-економічними проблемами сучасності вважаються: погіршення екологічної ситуації внаслідок концентрації виробництва і його відходів; викиди шкідливих речовин в атмосферу з відпрацьованими газами двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), які досягають 60% від валових. Одночасно з цим на частку дизельних двигунів припадає близько 50% переробленої нафти.

Покращення екологічних показників потребує пошук альтернативних палив для ДВЗ, максимального використання в с.-г. виробництві чистого виду енергії, яким може бути – електроенергія. Аналіз спроб використання інших альтернативних палив (газове паливо, паливо прямого зрідження вугілля, паливо на основі водню, метанолу, рослинних олій, біогаз і таке інше) призводить до висновку що сучасні технології виробництва біодизельного палива не здатні забезпечити дешевим паливом для тракторів, окрім нафти[6, с. 12-14.].

Створення мостового землеробства по вирощуванні продукції рослинництва запроваджено у 70-х роках в Японії, яка переживала період інтенсивного зменшення чисельності сільського населення. Сучасні умови розвитку сільського господарства в Україні призводять до зменшення чисельності працівників сільськогосподарського сектора, зменшення матеріально-технічного забезпечення, великих витрат на паливо-мастильні матеріали тощо. Вирішення проблем може стати створенням мостового землеробства основною відмінністю якого є створення інженерної зони з енергозабезпеченням.

У мостовій системі землеробства оброблювана ділянка не піддається впливу рушіїв трактора та опорних коліс с.-г. техніки, створюється можливість точного позиціювання робочих органів відносно поля, можливе застосування зонної обробки ґрунту. а також можливо використовувати крапельне зрошування. Використання машин з мостовим рухом по ділянках поля, за допомогою рельсових доріжок, частково вирішує ряд принципових питань автоматизації водіння і спрямовування машин в межах поля, і дає поштовх до проектування роботизованого виробництва[6, с. 56-69.].

#### Висновки до розділу 1

Ущільнення ґрунту призводить до багатьох негативних наслідків, які в впливають на зменшення якості ґрунту і урожайності сільськогосподарських культур. Серед багатьох факторів ущільнення ґрунту основними являються ті, що створюються рушіями МТА. Негативний вплив на механіко-технологічні властивості ґрунту наноситься МТА з великою масою, що мають високі значення ущільнення поверхні поля. Слідом виникають багатокритеріальні задачі при обґрунтуванні вибору складу машино-тракторного парку з проведення технологічних операцій. Аналіз наукових досліджень з використання електроенергії в землеробстві приводить до висновку, що одним з таких напрямків є створення мостового землеробства.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ УЩІЛЬНЕННЯ ГРУНТУ ХОДОВИМИ СИСТЕМАМИ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ

#### 2.1. Показники ущільнення ґрунту ходовими рушіями МТА

Ступінь ущільнення ґрунту ходовими системами машино-тракторними агрегатами згідно з ДСТУ 4521:2006 «Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт» оцінюється середнім питомим тиском ( $q_{cp}$ , МПа) [7, с. 6-9.]:

$$q_{cp} = \frac{m_e \cdot g}{L \cdot B}, \quad (2.1)$$

де  $m_e$  – маса трактора експлуатаційна, кг;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$L, B$  – розміри п'ятна контакту, м;

При русі агрегату виникає нерівномірний питомий тиск на ґрунт його рушіями (що залежить від кількості опорних котків, кроку гусениці, швидкості руху тощо.). На нерівномірність навантаження значно впливає розміщення центра ваги трактора. Таким чином, за показник ущільнюючої дії машино-тракторного агрегату на поверхню, прийнято «максимальний питомий тиск на ґрунт» ( $q_{max}$ ) [7, с. 6-9.]:

$$q_{max} = \xi_p \cdot q_{cp}, \quad (2.2)$$

де  $\xi_q$  – коефіцієнт нерівномірності навантаження на ґрунт (знаходиться в межах 2,5...5,1).

Для агрегатів з колісними рушіями «максимальний питомий тиск» на ґрунт визначається за формулою (2.3) [7, с. 6-9.]:

$$q_{max} = \sqrt{\left[ \left( \frac{G_k}{b \cdot D_p} \right) \right]} \left[ \frac{E_k \cdot E}{E_k \pm E} \right], \quad (2.3)$$

де  $E_k, E$  – модуль пружності гуми і деформації ґрунту, кН/м<sup>2</sup>;  
 $G_k$  – вага, яка діє на шину, кН;  
 $D_p$  – середній діаметр шини колеса (з приведеною деф. гуми), м;  
 $b$  – ширина шини, м..

Модуль пружності гуми колеса визначається [7, с. 6-9.]:

$$E_k = \frac{\omega_k \cdot b \cdot G_k}{f \cdot F_k}, \quad (2.4)$$

де  $\omega_k$  - коефіцієнт, що ураховує форму контакту шини з ґрунтом;  
 $f, F_k = L, B$  – зминання гуми шини і площа п'ятна контакту, м, м<sup>2</sup>.

Модуль пружності ґрунту визначається залежністю [7, с. 6-9.]:

$$E = \frac{[\omega \cdot (q_1 - q) (1 - \sigma^2)]}{S \cdot (z_1 - z_2)}, \quad (2.5)$$

де  $z_1, z_2$  – занурення плунжера твердоміра, зусилля проникнення  $q_1$  і  $q_2$ ;  
 $S$  – площа плунжера твердоміра; м<sup>2</sup>  
 $\sigma$  – коефіцієнт зсуву переміщеного ґрунту.

Оцінка впливу ущільнення ґрунту рушіями по сліду агрегату проводиться визначенням критерію щільності [7, с. 6-9.]:

$$\rho = \rho_0 + \beta \cdot P, \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{R(1 - \sigma^2)}{E \cdot h} \quad (2.7)$$

де  $\rho_{сл}, \rho_0$  – щільність ґрунту по сліду і до проїзду агрегату, г/см<sup>3</sup>;  
 $\beta$  – коефіцієнт відповідної пропорційності, 1/см<sup>2</sup>;  
 $P$  – показник ущільнюючої дії на ґрунт (формули 2.8 і 2.9), кН/м;

$h$  – висота сліду по колії, см.

Показник  $P$  визначає ущільнення рушієм поверхні (кН/м) визначається [7, с. 6-9.]:

$$P = \omega_k \cdot b_c \cdot q_{\max}, \quad (2.8)$$

де  $b_c$  – ширина профілю колії (для колісних рушіїв – ширина профіля гуми), м.

Якщо агрегат проходить по одній і тій ж колії ущільнення ґрунту запишеться [7, с. 6-9.]:

$$P_n = \omega_k \cdot b_c \cdot q_{\max} (1 + \chi \cdot \lg N_p) \quad (2.9)$$

де  $\omega_k$  – коефіцієнт, що ураховує форму контакту шини з ґрунтом ( $\omega_k \cong 1,25$ );

$\chi$  – показник інтенсивності нерелексивної внутрішньої деформації масиву ґрунту (обирається 1,0...1,5);

$N_p$  – кратність проїздів агрегату по тому місцю поля.

Агрегат скомплектований за двовісною схемою, то ущільнення ґрунту буде визначається:

$$P_{2x} = \omega_k \cdot b_c (q_{\max 1} + 0.45 k_{2x} q_{\max 2}) \quad (2.10)$$

де  $k_{2x}$  – коефіцієнт кратності потрапляння задньої осі в колію передньої.

Щільність ґрунту, таким чином, по сліду рушія залежить лінійно від величини  $P$ , що характеризує ущільнюючу дію ходової системи.

Щільність ґрунту ( $\rho_{сл}$ ) є також лінійна функція логарифма повторних проходів по одному сліду.

Допустима ущільнююча дія тракторів дорівнює:  $[P] = 75 \text{кН/м}$ , що відповідає максимальному питомому тиску на ґрунт  $q_{\text{max}} = 0,1 \text{МПа}$ . [7, с. 6-9.].

2.2. Допустимий рівень ущільнення ґрунту за критерієм урожайності с.-г. культур

Щільність ґрунту в значній мірі впливає на урожайність культур, а тому показник щільності – об'ємна маса ґрунту повинен знаходитись в допустимих межах. В більшості випадків під впливом ходових систем тракторів і сільськогосподарських машин ґрунт переущільнюється, що негативно впливає на урожайність культур (рис.2.1).

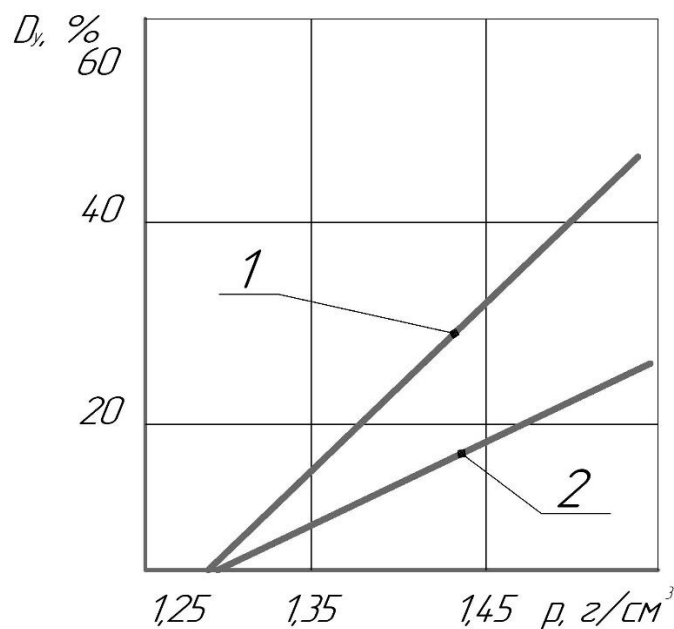


Рис.2.1. Залежність втрат урожаю ( $D_y$ ) від щільності ґрунту ( $\rho$ ). 1 – ячмінь; 2 – пшениця.

В наведеному прикладі щільність ґрунту  $1,30 \text{г/см}^3$  є гранично допустимим. За даними наукових установ доведено, що щільність ґрунту один з впливових факторів, які зменшують майбутній урожай. Для більшості сільськогосподарських культур оптимальна щільність ґрунту є  $1,0 \dots 1,3 \text{г/см}^3$ .

Щільність ґрунту залежить в значній мірі від питомого тиску рушіїв МТА, а тому його значення встановлено ДСТУ 4521:2006 і для колісних тракторів встановлено 0,12 мПа, а для гусеничних – 0,10 мПа. Реальні значення тиску існуючих тракторів перевищує вказані значення (0,20...0,30 мПа – для колісних, 0,15...0,20 мПа – для гусеничних тракторів).

Глибина ущільнення ґрунту сучасними тракторами досягає 35...50 см і зберігається до трьох років ущільнення ґрунту залежить також і від коефіцієнта буксування, а тому його значення не повинно перевищувати 0,2 [8, с. 37.].

Зменшення продуктивності с.-г. культур за рахунок тільки збільшення щільності і твердості ґрунту, за даними А. С. Кушнарьова, може визначатись емпіричною моделлю:

$$Q_y = 1 - \frac{1 - [a(\rho_{opt} - \rho)^2 + b(\rho_{opt} - \rho)^2]}{W_v} \quad (2.11)$$

де  $\rho_{opt}$  – оптимальне значення щільності ґрунту при максимальній врожайності, г/см<sup>3</sup>.

$\rho$  – експериментальне польове значення щільності, г/см<sup>3</sup>;

$a$  і  $b$  – емпіричні значення отримані експериментальним шляхом.

«Для визначення врожайності цукрових буряків, наприклад, прийняти відповідно 13,96 і 0,08. Найбільша врожайність озимої пшениці відповідає щільності ґрунту 1,2 – 1,3 г/см<sup>3</sup>, а для кукурудзи – 1,1 – 1,2 г/см<sup>3</sup>. Відхилення значення щільності ґрунту від оптимального як в меншу сторону, так і в більшу сторону призводить до зниження урожаю культури» [4, с. 37.].



### 2.3. Взаємозв'язок ущільнюючої дії на ґрунт різними видами ходових систем

При русі трактора і інших ходових систем машин по поверхні виникає переущільнення зон, що створюються поперек і по сліду рушія, (рис. 2.2).

Глибина ущільнення ґрунту (чорноземів) при вологості 20...23 % досягає 35...50 см. Питомий тиск на ґрунт відповідно з ДСТУ 4521:2006 не повинен перевищувати тракторів з гусеничним рушієм 0,1 МПа, з колісним – 0,12 МПа. Реальний розподілений тиск складає: 0,15...0,20 МПа – для гусеничних 0,20...0,30 мПа – для колісних і більше. Ущільнення ґрунту досягає значної глибини і переущільнення підорного шару може стати великою проблемою.

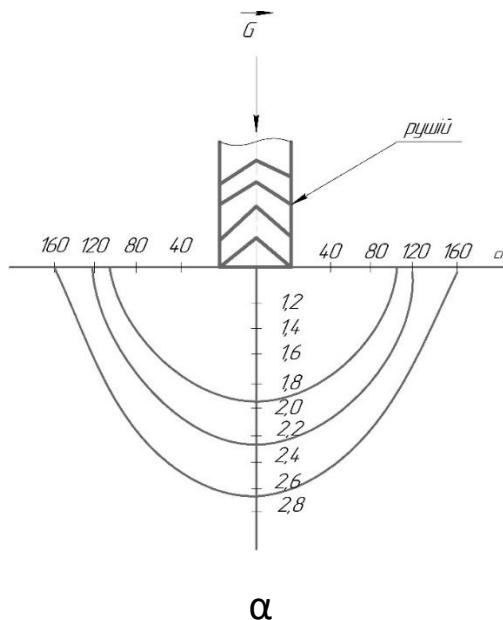


Рис.2.2. Зони ущільнення ґрунту під дією колісного рушія

$\alpha$  – ступінь збільшення твердості ґрунту відносно контрольної ділянки.

Вплив на ущільнюючу дію параметрів і типів рушіїв МТА визначається також характером розподіленого навантаження.

Широке розповсюдження в теорії трактора має розподілення тиску по опорній поверхні рушія за лінійним законом (рис. 2.3) і тиск на ґрунт визначається [9, с. 136.]:

$$q_p = \left( \frac{G_e}{b \cdot L} \right) \cdot \left( \frac{3X_L}{L-1} \right) \quad (2.12)$$

$$B \quad q_z = \left( \frac{G_e}{b \cdot L} \right) \left( \frac{\frac{2}{3} X_L}{L} \right) \quad (2.12a)$$

де  $G_e$  – сила ваги, кН;

$b, L$  – ширина, довжина зони контакту гусеничного рушія, м;

$X_L$  – координата розташування рівнодіючої епюри, м.

Епюри тиску представлені рис. 2.3.

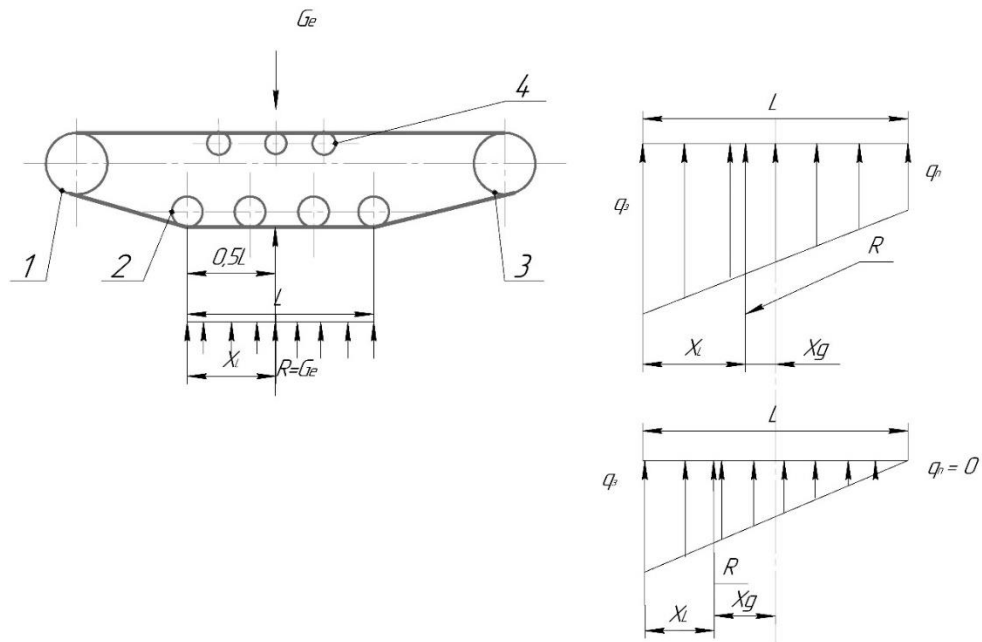


Рис. 2.3. Розрахункові епюри тиску гусеничного рушія на ґрунт:

1 - направляюче колесо; 2 – опорний коток; 3 - ведуча зірочка; 4 – підтримуючий ролик.

Такого виду епюри тиску на ґрунт побудовано на припущеннях: кількість опорних котків дорівнює нескінченності; гусеничний рушій являє стержень, який знаходиться на еластичній поверхні; пружність стержня в порівнянні з еластичністю ґрунту відповідає нескінченній величині. Тоді, середній тиск при таких припущеннях визначаємо [10, с. 103-106.]:

$$q_{cp} = \frac{G_e}{2 \cdot b \cdot L} \quad (2.13)$$

звідки

$$q_{cp} = \frac{m_e \cdot g}{2 \cdot b \cdot L}$$

В дійсності епюра тиску рушіїв трактора на ґрунт нерівномірна, рис. 2.4.

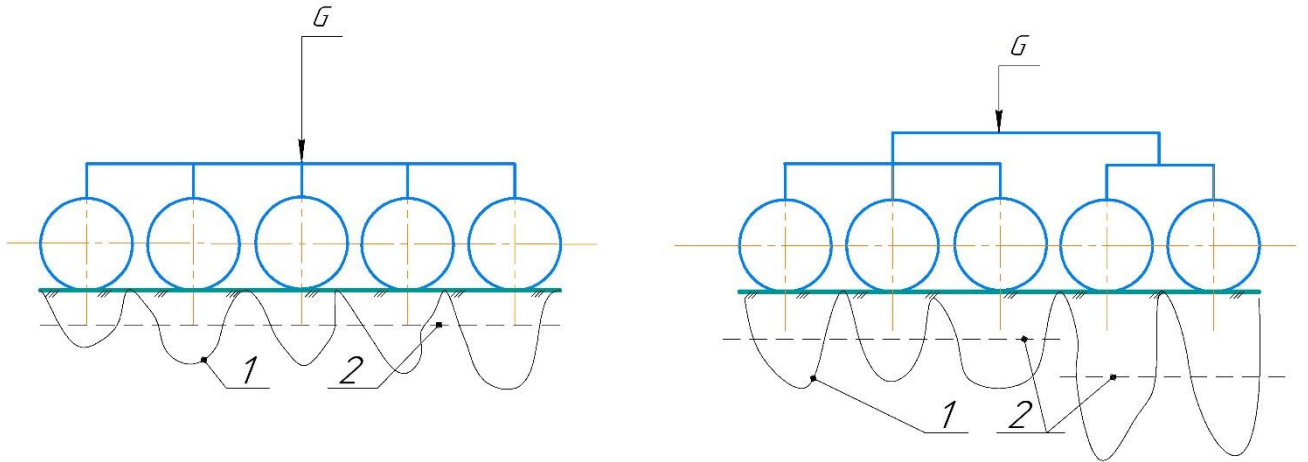


Рис.2.4. Епюра тиску на ґрунт опорних рушіїв с.-г. машин при різних  
компоновках

1 – нерівномірність розподілення питомого тиску; 2 – апроксимація значень.

Залежність нерівномірності розподілення питомої величини тиску змінюється в залежності від схеми еластичних систем і приблизно становить 3,1...4,9.

Для еластичних систем буде визначатись [11, с. 12-13.]:

$$\Psi = 1,75 + 0,085l^2 + 1,52\sqrt{\frac{k}{5,65l - 1}}, \quad (2.14)$$

для напівеластичних підвісок:

$$\Psi_{н.е.} = 1,85 + 0,63l^2 - 0,65m_e^{0,27V}. \quad (2.15)$$

де  $l = \frac{L}{n-1} \cdot t$  – середнє відношення віддалі між опорними котками до кроку гусениці.

$L$  – довжина опорної поверхні між рушіями, м;

$n$  – кількість рушіїв по одному борту.

$$v = X_g/L$$

$k$  – коефіцієнт нерівномірності розподіленого навантаження на опорні рушії.

Залежність довжини трака і кількості опорних котків на величину питомого тиску на поверхню поля трактором ДТ-75М [12, с. 24-28.]:

$$P_{kp} = 30000H, m_e = 7,8m, L = L_0 + t = 1780_{MM}$$

Зміщення рівнодіючої для гусеничних рушіїв становить  $X_g = \pm 100_{MM}$ .

Висновки до розділу 2

Збільшення кількості опорних катків дозволяє знизити ущільнення ґрунту трактора з кроком  $t = 200$  мм і шириною  $b = 450$  мм на 19 % тобто з 0,7 МПа до 0,5 МПа. Результату зниження питомого тиску можливо досягнуть слідуючим чином: довжиною трака гусениці (до 320 мм) не змінюючи кількість опорних поверхонь, тобто котків  $n \geq 4$ ; збільшення кількості опорних котків від шести і більше з одноразовим збільшенням ширини трака приблизно на 15 % ( $b = 420 \dots 450$  мм).

Результатом зміни довжини і ширини рушія стало зменшення питомої величини ущільнення поверхні на 11,5%. В результаті розрахунків було встановлено, що збільшення довжини бази тракторів позитивно впливає на зменшення величини тиску на ґрунт ніж збільшення ширини рушія, та зменшу його на 10 %. Параметр ущільнення поверхні ґрунту має пропорційну залежність від кроку встановлення ланок гусеничного рушія.

Використання гумово-тросового рушія значно впливає на зменшення ущільнюючої дії на ґрунт. Необхідно забезпечувати для тракторів з колісною формулою 4x4 з передньою ведучою вісю, зміщення центра мас приблизно в діапазоні (1300..1700 мм), що зменшу буксування та переущільнення ґрунту.

РОЗДІЛ 3  
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СПОСОБИ ЗМЕНШЕННЯ  
УЩІЛЬНЮЮЧОЇ ДІЇ НА ГРУНТ ХОДОВИХ СИСТЕМ МТА

Дослідженнями багатьох авторів доведено, що при зростанні швидкості руху агрегату контактний тиск ходових систем МТА на поверхню варіюється. Дослідниками доведено, що зростання робочої швидкості МТА має позитивний наслідок по зниженню внутрішніх нормальних напружень в ґрунтового середовищі.

Це пов'язано з тим, зростаюча робоча швидкість, зменшує час дії деформатора, тобто рушія, при незмінній експлуатаційній вазі. В цьому випадку ґрунт, має здатність зміцнитися, що може враховуватись (за Покровським Г.І.) збільшенням модуля деформації ґрунту

$$E = E_0 \left| 1 + \frac{B}{T} \right|, \quad (3.1)$$

де  $E$ ,  $E_0$  – динамічний і статичний модуль деформації ґрунту при навантаженні;

$B$  – емпіричний коефіцієнт, який визначає тип ґрунту;

$T$  – час прикладання деформації.

Скориставшись результатом Я. С. Агейкіна, який визначив математичну модель ущільнюючої дії рушіїв  $q_{(v)}$  в залежності від робочої швидкості руху МТА:

$$q_v = \frac{q_{\max}}{1 + \frac{B \cdot V}{L \cdot N}} \quad (3.2)$$

де  $q_{(v)}$ ,  $q_{\max}$  – питомий тиск на поверхню при  $V > 0$  і при  $V = 0$ ;  
 $V$  – швидкість руху, м/с;  
 $L$  – параметри п'ятна контакту з ґрунтом, м;  
 $N$  – частота повторних проходів рушіїв.  
Коефіцієнт  $B$  визначається:

$$B = \frac{k}{2\varphi} \quad (3.3)$$

де  $k = \frac{1^0}{c}$ ;

$\varphi$  – кут природного відкосу ґрунту.

$B$  залежності від швидкості руху агрегату деформація масиву (формула Ульяновова Н.В.) буде: (при умові, що робоча швидкість не більша 6 м/с):

$$E_v = E \cdot \left( \frac{1}{\theta \sqrt{V}} \right) \quad (3.4)$$

де  $\theta = 0,09 \dots 0,12$  важких суглинків і  $\theta = 0,05 \dots 0,07$  – для легких супіщаних ґрунтів.

Дослідженнями ЦНПМЕ встановлено, що із збільшенням швидкості руху тиск під п'ятном контакту зростає і визначається за моделлю:

$$q_v = q_{\max} + C_v V^2, \quad (3.5)$$

де  $C_v$  – коефіцієнт пропорційності, рівний 1500...1600 Па/с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

3.1. Результати визначення залежності питомого тиску на ґрунт від величини робочої швидкості МТА

Результати досліджень показали:

– питомий тиск на ґрунт МТА з гусеничними рушіями зі підвищенням робочої швидкості зростає не залежно від ваги МТА згідно формул (2.12, 2.12а);

– ущільнення ґрунту колісними рушіями при підвищеній динаміці залишається постійним, (граф. рис. 3.1, а і 3.1, б.)

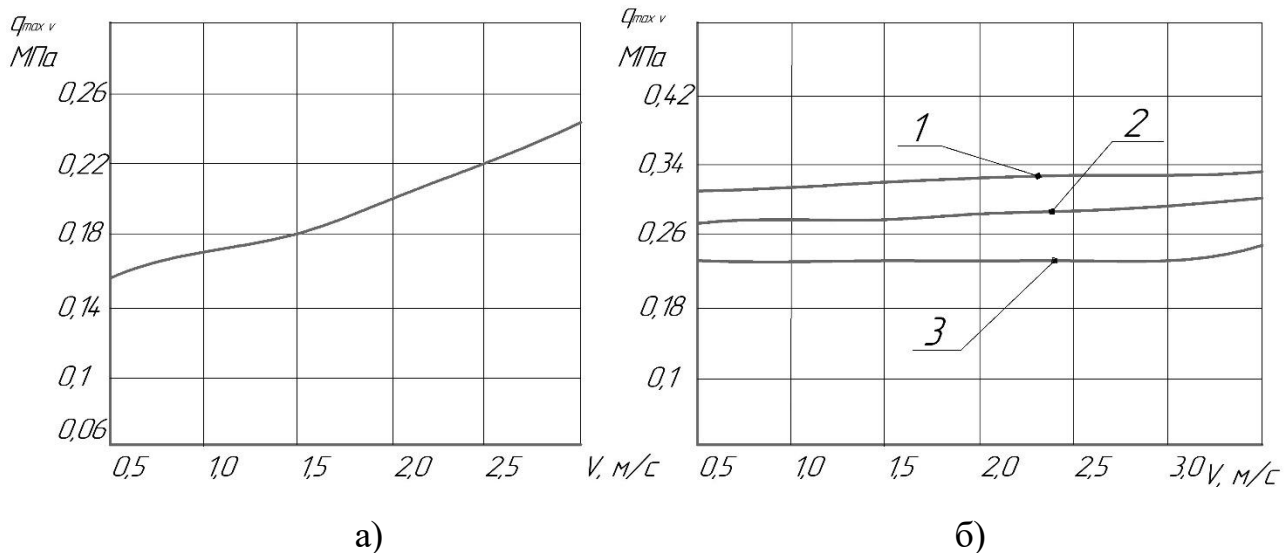


Рис. 3.1. Залежність питомого тиску на ґрунт від швидкості руху, гусеничного рушія трактора ДТ-75М,  $P_r = 22...26$  кН - (а). Залежність питомого тиску на ґрунт від швидкості руху трактора за тиском в шинах (б): 1 – 0,14; 2 – 0,1; 3 – 0,06; МПа.

Отримано дані про вплив швидкості руху на вертикально-повздожню деформацію (глибину сліду) ґрунту рушіями тракторів. Глибину прогрузання в ґрунт рушіїв МТА розраховували за моделлю Я. С. Агейкіна:

$$h = \frac{q_{\max(v)}}{E_0} \cdot \frac{1}{C_v} \quad (3.6)$$

де  $q_{\max(v)}$  – питомий показник тиску ходової системи на опорну поверхню, МПа.

$E_0$  – модуль пружності ґрунту.

Провівши відповідні розрахунки можна стверджувати, що питомий тиск на поверхні контакту при різних умовах роботи, властивостей ґрунтового середовища та типів ходових систем МТА, зростає при певній взаємодії факторів і має квадратичну залежність, що досить важко визначити. Щоб досягнути більш точних результатів необхідно провести експериментальні випробування (рис 3.2.).

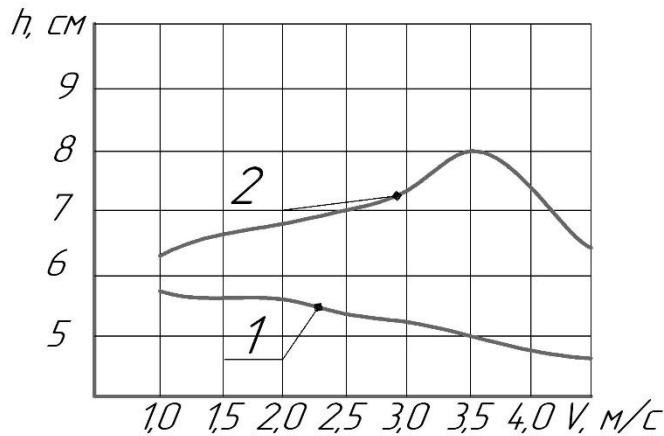


Рис. 3.2. Залежність глибини сліду від швидкості руху рушіїв МТА  
1 – трактор ДТ-75М, 2 – трактор Т-150К-09.

### 3.2. Результати експериментальних досліджень по визначенню твердості ґрунту

Необхідне обладнання твердомір Рев'якіна, штангенциркуль, досліджуваний ґрунт, міліметровий папір. Твердомір (рис. 3.3, а) має два направляючий шток 1, телескопічну цангу 2 набір плунжерів 4, пружину 2, планки для кріплення паперу, записувального пристрою і натискних тримачів. Записувальний пристрій сполучений із пружиною 2. Важелі механізму встановлені так, що самописець переміщується по вертикалі (вісь *ординат*) занурення плунжера і по горизонталі (вісь *абсцис*) на відстань стискання пружини, в залежності від її жорсткості.

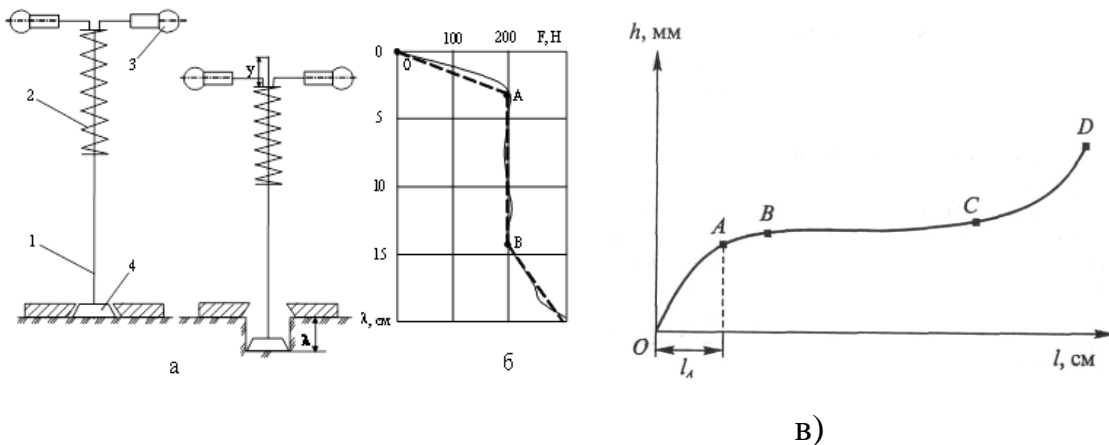


Рис. 3.3. Схема твердоміра Рев'якіна (а) отримана залежність  $F=f(l)$  (б):

1 – шток; 2 – пружина; 3 – руків'я; 4 – плунжер



Значення об'ємного зминання ґрунту  $i$  є твердість ґрунту. Твердість ґрунтів визначають твердомірами. Під час заглиблення в ґрунт плунжера твердоміра отримуємо графічну залежність (рис. 3.3., б).

На графіку видно три зони. Перша ділянка ( $OA$ ) опір деформації зростає пропорційно відстані проникнення плунжера в масив на глибину 5...8 см. Друга зона « $A-B$ » є проміжною. Під час заглиблення плунжера під його основою утворюється конусоподібний наплив із переуцільненого ґрунту (уцільнена маса). На третій ділянці ( $BC$ ) масив зминається напливом, що деформує його, розсуваючи на сторони, сприймаючи, при цьому, постійний опір (ґрунт "тече"). Перша фаза деформації найкоротша, але має цінне практичне значення, тому що уцільнення ґрунту рушіями с.-г. машин, за правило, не перевищує границі першої ділянки графіка. Коли плунжер досягає дна підшви шару ґрунту крива  $CD$  різко підіймається вгору, тому що плунжер зі штоком натикається на переуцільнену "плужну підшву". Твердість ґрунту (кПа) визначають за формулою [16, с. 56-57.]:

$$T = \frac{10 \cdot \bar{h} \cdot m}{S}, \quad (3.7)$$

де  $\bar{h}$  – середня координата графіка, мм;

$m$  – жорсткість пружини (визначається із тарувальної характеристики згідно епюри), у даному твердомірі  $m = 10$  Н/мм;

$S$  – площа поперечного перерізу плунжера, см<sup>2</sup>.

Для характеристики ґрунту використовують також коефіцієнт об'ємного зминання ґрунту (Н/см<sup>3</sup>) [17, с. 44-45.]:

$$q = \frac{P_A}{S \cdot l_A} = \frac{h_A \cdot m}{S \cdot l_A}, \quad (3.8)$$

де  $P_A$  – зусилля, необхідне для занурення плунжера до межі пропорційності, Н;

$l_A$  – занурення плунжера, що дорівнює  $P_A$ , см;

$h_A$  – ордината діаграми, яка відповідає межі пропорційності (точка  $A$ ), мм.

Отримавши за допомогою твердоміра Ревякіна ряд графічних діаграм твердості ґрунту, обробивши дані з даних залежностей, провівши математичні розрахунки результатів дослідження, отримали наступні значення (табл. 3.1, 3.2.)

Твердість ґрунту зростає по збільшенні глибини. Тому згідно рекомендацій заміри твердості ґрунту виконують на глибині 0 – 10 см, 11 – 20 см, 21 – 30 см. Для певних меж глибини через кожні 2 см на діаграмі визначають величину  $h_i$ . Значення меж глибини та інтервалів  $h$  можна прийняти іншими [13, с. 121-124].

Здійснено обробку отриманих даних методами математичної статистики з розрахунком середньої арифметичного величини  $M$ , середнього квадратичного відхилення  $\sigma$  і коефіцієнта варіації  $V$ . Отримані значення представлені в табл. 3.1., 3.2.

Таблиця 3.1.

Результати вимірювань твердості ґрунту

| Глибина, см                            | 0 – 5 |   |    |       |       |       | 6 – 10 |       |       |       |       | 11 – 15 |       |       |       |       |
|--|-------|---|----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Глибина занурення наконечника $H$ , см | 0     | 1 | 2  | 3     | 4     | 5     | 6      | 7     | 8     | 9     | 10    | 11      | 12    | 13    | 14    | 15    |
| Ордината діаграми $h_i$ , мм           | 0     | 4 | 10 | 10, 9 | 11, 8 | 12, 2 | 12, 6  | 12, 6 | 13, 6 | 13, 6 | 14, 5 | 14, 5   | 14, 5 | 15, 7 | 16, 3 | 17, 3 |

## Результати розрахунків твердості ґрунту

| Глибина, см   | 0 – 5      |   |    |      |      | 6 – 10     |      |      |      |      | 11 – 15    |      |      |      |      |      |
|---|------------|---|----|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|
| Глибина занурення наконечника $H$ , см                | 0          | 1 | 2  | 3    | 4    | 5          | 6    | 7    | 8    | 9    | 10         | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| Ордината діаграми $h_i$ , мм                          | 0          | 4 | 10 | 10,9 | 11,8 | 12,2       | 12,6 | 12,6 | 13,6 | 13,6 | 14,5       | 14,5 | 14,5 | 15,7 | 16,3 | 17,3 |
| Середня арифметична величина $\bar{h}_i$ , мм         | 8,150      |   |    |      |      | 13,380     |      |      |      |      | 15,660     |      |      |      |      |      |
| Середнє квадратичне відхилення $\sigma$ , мм          | 4,553      |   |    |      |      | 0,717      |      |      |      |      | 1,076      |      |      |      |      |      |
| Коефіцієнт варіації $V$ , %                           | 55,860     |   |    |      |      | 5,356      |      |      |      |      | 6,873      |      |      |      |      |      |
| Твердість ґрунту $T$ , кПа                            | 259554,140 |   |    |      |      | 426114,650 |      |      |      |      | 498726,115 |      |      |      |      |      |
| Коефіцієнт об'ємного змінання $q$ , Н/см <sup>3</sup> | 7,960      |   |    |      |      |            |      |      |      |      |            |      |      |      |      |      |

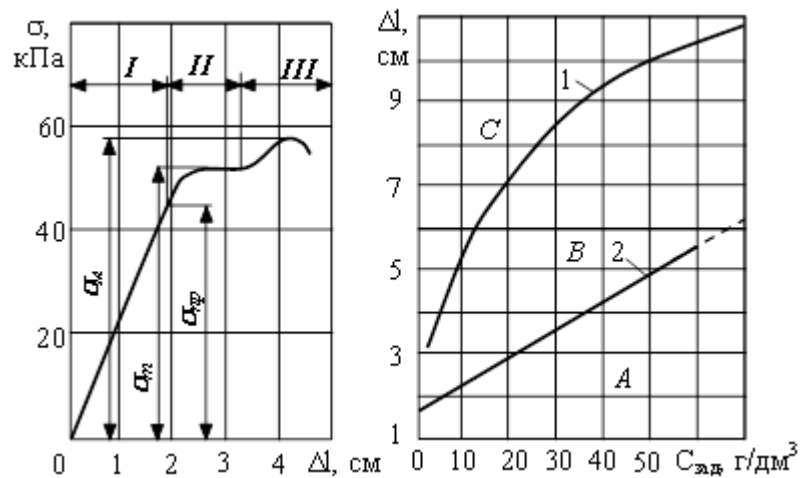


Рис. 3.4. Аналітичні залежності нормальних напружень ґрунту і деформації  $\Delta l$  (а) та граничної деформації ґрунту  $\Delta l$  від ступеня його твердості  $C_{mv}$  (б)

Вплив вологості та механічного складу на відповідність ґрунту можна визначати за діаграмою Петрова Г.Д. (рис. 3.5.).

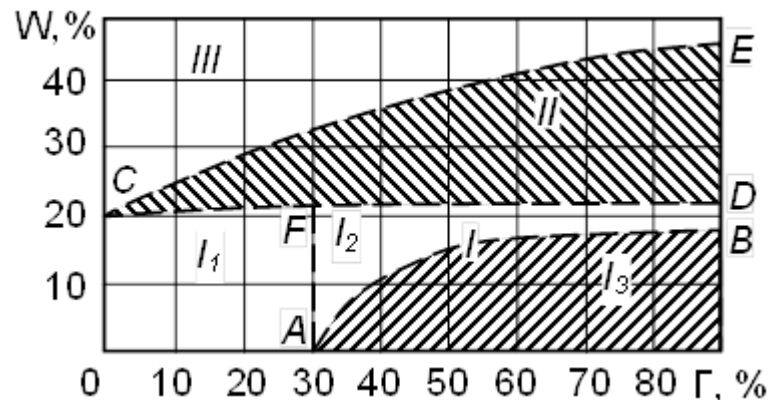


Рис. 3.5. Залежність властивості реального масиву увідсотках суглинку і  
вологи  $y = f(\Gamma, W)$

На рисунку ділянки CE і CD відповідають верхній і нижній межі пластичності. Ці криві ділять площу діаграми на три зони:

- I – тверда (відмічається миттєве кришіння).
- II – еластична (відбувається налипання на робочі поверхні органів машин).
- III – текучість (ґрунт перебуває у вигляді текучого тіла).

Першу ділянку I можна розділити на три зони I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> і I<sub>3</sub>, які відрізняються механічними властивостями при обробці. Нижня частина підзони I<sub>1</sub> має властивості фізичного піску. Рухаючись по кривій вгору на ділянці підзони пісок переходить у фазу супіску і середній суглинок, вміст води зростає. У нижній частині ділянки підзони I<sub>3</sub> розміщується щільна суха фізична глина. Рухаючись по діаграмі вліво сухий суглинок, який механічно важко піддається обробці. У лівій верхній зоні підзони I<sub>2</sub> і є ґрунт, який найбільш бажаний для механізованого обробітку.

Ступінь задернілості ґрунту значно впливає на якість обробки ґрунту.

Графік розтягнення зразка задернілого ґрунту (рис. 3.4, а) має три характерних ділянки: I – деформація росте пропорційно навантаженню, II – деформація росте без зростання нормального напруження, III – напруження

зростають до критичної межі міцності і різко падають, наслідок руйнування зразка [16, с. 112-114].

### 3.3. Способи зменшення ущільнюючої дії на ґрунт МТА

На основі отриманих даних запропоновані основні шляхи модернізації машин і їх ходових систем, запровадження яких дасть змогу знизити питомі показники ущільнення масиву ґрунту опорними та ведучими рушійми (рис 3.6) [14, с. 134-138.].

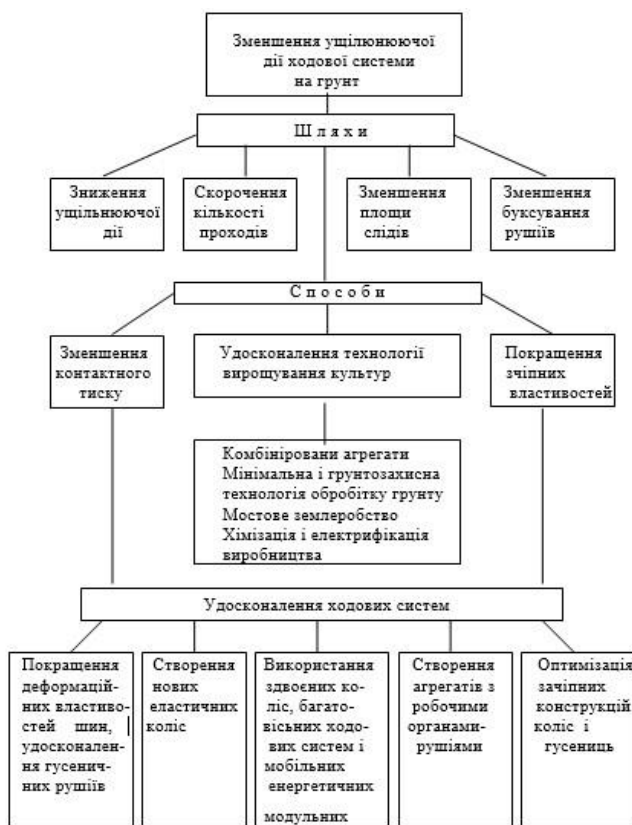


Рис. 3.6. Шляхи і методи зниження ущільнюючої дії на ґрунт ходових систем МТА

Збільшуючи робочу ширину захвату сільськогосподарських машин і довжину гонів відносна площа, що ущільнюється колісними та гусеничними рушійми тракторів зменшується (рис.3.7.).

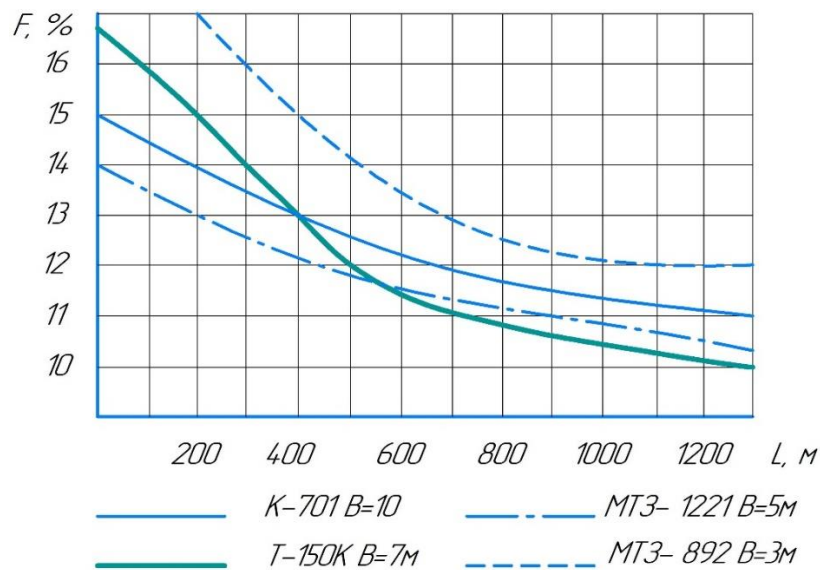


Рис.3.7. Залежність площі  $F$  поля, що ущільнюється рушіями, від довжини гонів  $L$  ( $B$  – ширина захвату агрегату)

Перехід до однієї базової колії МТА, транспортних засобів для різних просапних культур також зменшує шкідливу дію рушіїв на ґрунт, рис. 3.8. Впровадження сучасних технологій виробництва с.-г. сировини вимагають створювати на посівних площах додаткові технологічні проміжки для руху велико габаритних МТА.

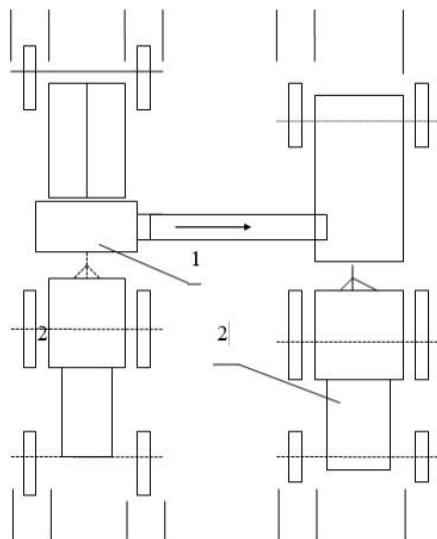


Рис. 3.8. Схема паралельного руху по полю  
1 - збиральний агрегат; 2 – транспортний засіб.

Необхідно запровадити такий спосіб руху агрегатів і вантажного транспорту по наміченій постійній траєкторії; під час виконання технологічних процесів, забезпечити обробіток тільки площі вирощування, оминаючи транспортні колії.

Агрегат, (рис. 3.9), обладнаний автоматичною системою (АСУ) керування. Розміщення по всій ширині захвату опорних коліс МЕЗ при низькому тиску повітря в шинах мінімально ущільнює ґрунт. Ущільнення ґрунту при його проході менше ніж у колісного трактора класу 1,4.

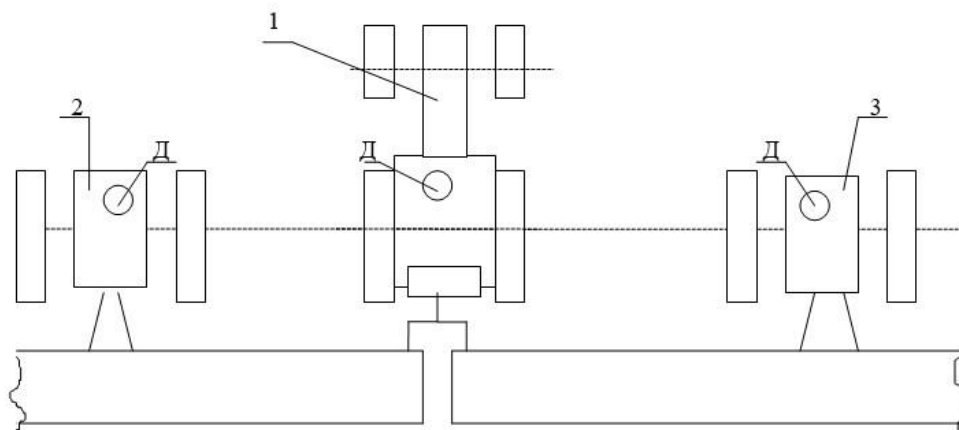


Рис. 3.9. Схема широкозахватного агрегату з енергетичним модулем.

1 – енергетичний модуль, 2, 3 – технологічні модулі.

Метод неспіввісного розташування опорних котків і рушіїв теж досить ефективний спосіб уникнути переущільнення масиву ґрунту під час використання широкозахватних комбінованих ґрунтообробних, посівних агрегатів, використання гумово-тросових гусеничних рушіїв у причепах для перевезення врожаю, з приводом на них та без нього (рис. 3.10.). Таким чином, гусеничні рушії тракторів мають резерви конструкційного зменшення контактного тиску на ґрунт.

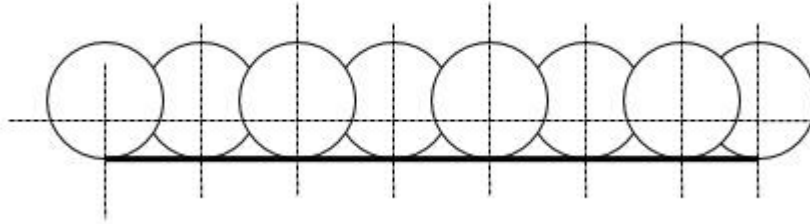


Рис. 3.10. Схема неспіввісного розміщення опорних котків

### Висновки до розділу 3

За результатами досліджень можна зробити на ступні висновки:

питомий тиск на ґрунт МТА з гусеничними рушіями зі підвищенням робочої швидкості зростає не залежно від ваги МТА. Ущільнення ґрунту колісними рушіями при підвищеній динаміці залишається постійним.

Здійснено розрахунок результатів методами математичної статистики з визначенням середньої величини  $M$ , середнього квадратичного відхилення  $\sigma$  і коефіцієнта варіації  $V$ . Отримані значення представлені в табл. 3.1.

На основі отриманих даних запропоновані основні шляхи модернізації машин і їх ходових систем, запровадження яких дасть змогу знизити питомі показники ущільнення масиву ґрунту опорними та ведучими рушіями (рис 3.6).

Із збільшенням ширини захвату МТА і довжини гонів відносна площа, що ущільнюється колесами і гусеницями тракторів зменшується приблизно на 5...6 % (рис.3.7.).



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Негативний вплив на механіко-технологічні властивості ґрунту наноситься МТА з великою масою, що мають високі значення ущільнення поверхні поля. Слідом виникають багатокритеріальні задачі при обґрунтуванні вибору складу машино-тракторного парку з проведення технологічних операцій.
2. Збільшення кількості опорних катків дозволяє знизити ущільнення ґрунту трактора з кроком  $t = 200$  мм і шириною  $b = 450$  мм на 19 % тобто з 0,7 МПа до 0,5 МПа. Результату зниження питомого тиску можливо досягнуть слідуючим чином: довжиною трака гусениці (до 320 мм) не змінюючи кількість опорних поверхонь, тобто котків  $n \geq 4$ ; збільшення кількості опорних котків від шести і більше з одноразовим збільшенням ширини трака приблизно на 15 % ( $b = 420 \dots 450$  мм).
3. Результатом зміни довжини і ширини рушія стало зменшення питомої величини ущільнення поверхні на 11,5%. В результаті розрахунків було встановлено, що збільшення довжини бази тракторів позитивно впливає на зменшення величини тиску на ґрунт ніж збільшення ширини рушія, та зменшу його на 10 %. Параметр ущільнення поверхні ґрунту має пропорційну залежність від кроку встановлення ланок гусеничного рушія.
4. Здійснено розрахунок результатів методами математичної статистики з визначенням середньої величини  $M$ , середнього квадратичного відхилення  $\sigma$  і коефіцієнта варіації  $V$ .
5. На основі отриманих даних запропоновані основні шляхи модернізації машин і їх ходових систем, запровадження яких дасть змогу знизити питомі показники ущільнення масиву ґрунту опорними та ведучими рушіями (рис 3.6).Із збільшенням ширини захвату МТА і довжини гонів відносна площа, що ущільнюється колесами і гусеницями тракторів зменшується приблизно на 5...6 % (рис.3.7.).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ходова система – грунт – врожай / Ксенович І.П., Скотніков В.А., Ляско М.І. – М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
2. Сучасна землеробська механіка / Кулен А., Куіперс Х./ Пер. з англ. А.Е. Габріеляна; Під ред. і передмов. Ю.А. Смирнова. – М.: Агропромиздат, 1996. – 349с.
3. Обґрунтування параметрів колісних рушіїв машинно-тракторних агрегатів на основі взаємодії з ґрунтовим середовищем / автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11 / Білецький Віктор Романович ; Львівський держ. аграрний ун-т. - Л., 2006. - 20 с.
4. А.С. Кушнарєв, В.М. Мацепура Уменьшение вредного воздействия на почву рабочих органов и ходовых систем машин-ных агрегатов при внедрении промышленных технологий возделывания сельскохозяйственных культур (лекция) – М.: 1986. 55с.
5. Г. Конке, А. Бертман Охрана почвы (перевод с английского) – М.: Издательство сельскохозяйственной литературы, плакатов, журналов, 1962, 243с.
6. В.О. Улексін Мостове землеробство Дніпропетровський аграрний університет: –Дніпропетровськ, 2005, с.118.
7. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. – К.: Держспоживстандарт України. – 2007. – 9 с.
8. Надикто В. Визначення максимального буксування коліснихт рушіїв з урахуванням обмеження їх тиску на ґрунт / В. Надикто // Техніка і технології АПК. – 2014.– №7. С. 34-38
9. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства / Г.М. Кутьков. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 506 с.
10. Ляско М.І., Рубенчик Є.В. Вплив конструктивних параметрів ходової системи трактора на розподіл питомого тиску по довжині опорної поверхні

гусениці. – Праці УСХА. Вдосконалення організації і технології ремонту сільськогосподарських машин. Київ: 1982, с. 103–106.

11. Емінбейлі З.Н., Бабаєв М.К., Керімов Ю.Б., Аскеров Г.А. Особливості ущільнення ґрунту гусеничними тракторами при роботі на схилі. Механізація і електрифікація сільського господарства, 1995, № 8, с.12 – 13.

12. Дранішніков О. Огляд і сучасні удосконалення гусеничного рушія. – Новини агротехніки, № 5, 2004, с. 24 – 28

13. Заєць М. Л. Вплив на ущільнюючу дію параметрів колісного рушія / М. Л. Заєць, С. Л. Попроцький // Наукові читання–2020Б: науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики, 5-6 березня 2020 р. Житомир: ЖНАЕУ, 2020. С. 121-124.

14. Заєць М. Л. Вплив ущільнюючої дії на ґрунт параметрів гусеничного рушія / М. Л. Заєць, С. Л. Попроцький // Біоенергетичні системи: Матеріали ІV міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». Частина 2, 29 травня 2020 р. Житомир: Поліський національний університет, 2020. С. 138-143.

15. Справочник по почвозащитному земледелию под редакцией И.Н. Безручко, Л.Я. Мальчевской – К.: Урожай, 1990, 278с.

16. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник / О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, В.М. Швайко, та ін; За ред. С.С. Яцуна. – К.: Мета, 2003. - 448с.: іл..

17. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Практикум: Навч. посібник / Д.Г. Войтюк, О.М. Царенко, В.М. Швайко, та ін; За ред. С.С. Яцуна. – К.: Аграрна освіта, 2000. - 93с.: іл..

18. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / Г.А. Хайліс, А.Ю. Гербовий, З.О. Гошко, М.М. Ковальов, О.О. Налобіна, С.Ф. Юхимчик. - Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 1998. - 268с.

19. Bekker M.G. Theory of land locomotion. Michigan University, 1955.
20. Физико-механические свойства растений, почв удобрений (Методы, приборы и характеристики). - М.: Колос, 1970. - 343с.
21. Кушнарёв А.С., Кочев В.И. Механико-технологические основы обработки почвы. -К.: Урожай, 1989. - 144с.