

Механізація

УДК 631.4; 631.31

В. Р. Білецький

к. т. н.

В. О. Шубенко

к. т. н.

І. С. Томашевський

Житомирський національний агроекологічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СТАНУ ҐРУНТУ ПІД КОЛІСНИМ РУШІЄМ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ

На основі результатів аналітичних досліджень впливу колісних рушіїв на напружено-деформований стан ґрунту встановлено, що гранична величина суми головних напружень у ґрунті, з огляду на запобігання ущільнюючої дії колісного рушія трактора типу Т-150К, не повинна перевищувати значення 0,113МПа для мінерального дерново-підзолистого слабкооглеєного супіщаного ґрунту. Визначається показник шкідливості впливу рушіїв на ґрунтове середовище, як відношення оптимальної щільності ґрунту до його середньої щільності після обробітку.

Ключові слова: рушії, трактор, напружено-деформований стан, ущільнення.

Постановка проблеми

Широкого застосування в Україні в цілому і в зоні Полісся зокрема, в системах технологій виробництва продукції рослинництва набув колісний трактор Т-150К, як мобільний засіб до системи машин. Використання зазначеного трактора забезпечує зменшення енерговитрат та витрат праці, в порівнянні з іншими мобільними засобами. Однак, в силу своїх конструкційних особливостей рушії трактора Т-150К оснащені серійними шинами 21,3R24 незворотньо деформують ґрунтове середовище, що призводить до накопичення залишкових деформацій, руйнування агроструктурних агрегатів ґрунту (особливо дерново-підзолистих ґрунтів) їх переущільнення, і, як наслідок, до значного погіршення фізико-механічних властивостей ґрунту, що в свою чергу зумовлює погіршення агроекологічного стану ґрунту та умов розвитку сільськогосподарських рослин. Тому, обґрунтування оптимальних конструкційних параметрів колісних рушіїв трактора Т-150К, які запобігатимуть зазначеним негативним наслідкам, сприятимуть більш повному використанню потенційної родючості ґрунтів, зменшенню їх переущільнення і як наслідок, підвищенню рівнів техногенної безпеки сільськогосподарського виробництва є актуальною задачею покращення агроеколандшафтів у цілому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Під дією колісних рушіїв мобільної сільськогосподарської техніки у ґрунті виникає об'ємний напружено-деформований стан, який залежить від величини і розподілення зовнішнього навантаження та залежить від конструкційно-експлуатаційних параметрів рушіїв і фізико-механічних властивостей ґрунту, але не залежить від вибору координат, які визначають положення векторів напружень [5].

Попередні дослідження контакту рушіїв з ґрунтом показали, що числовий розв'язок задачі необхідно будувати за певну кількість послідовних наближень, поступово ускладнюючи розрахункову модель. У першому наближенні ґрунт розглядається як пружний невагомий масив, що нескінченно продовжується в інших напрямках та обмежений зверху горизонтальною площиною (так званий пружний напівпростір) [7].

Середовище, (в даному випадку ґрунт) яке заповнює напівпростір, розглядається як однорідне та ізотропне. Для такої постановки задачі існує відомий розв'язок Буссінеска [4, 6]. В задачі Буссінеска напруження поблизу точки прикладення зосередженої сили прагнуть до нескінченності і завдяки цьому поблизу цієї точки виникає деяка обмежена зона, де матеріал переходить у стан пластичної текучості. Поза цією зоною напруження в середовищі в жодній точці не перевищують межі пружності. Очевидно, розподілення напружень в масиві симетричне відносно осі x . На верхній граничній площині напівпростору або на лінійній межі напівплощини напруження мають дорівнювати нулю, за винятком точки O , в якій діє вертикальна сила P .

Для розрахунку напружено-деформованого стану і проведення оптимізації ширини рушія необхідно отримати розв'язок зворотньої контактної задачі з умови рівномірного розподілення контактних напружень в зонах A та B (рис.1), що дозволяє одержати найбільш оптимальне, з точки зору еколого-агрономічних критеріїв, розподілення полів напружень в пружно-пластичному напівпросторі XOY (рис. 1).

Мета, завдання та методика досліджень

Підвищення рівнів агроекотехнологічної безпеки операцій обробітку дерново-підзолистих ґрунтів та зменшення переущільнення їх орного шару шляхом обмеження питомого тиску на них з боку ходової частини трактора Т-150К. Визначення ступеня та зменшення шкідливого впливу колісних рушіїв на ґрунт.

Пропоновані дослідження проведемо із використанням методик встановлення напружено-деформованого стану ґрунту під дією двох блоків розподіленого навантаження.

Результати досліджень

Аналітичні дослідження напружено-деформованого стану ґрунту під дією колісних рушіїв.

Розглянемо розв'язок для полів напружень, як суперпозицію розв'язків від двох зосереджених сил $G/2$, перпендикулярних до осі x (рис. 1).

Для визначення полів напружень і деформацій від однієї зосередженої сили $G/2$, перпендикулярної до границі $x=0$, можна користуватися розв'язком Фламана [6] (рис.2).

Для цього необхідно перейти до нової системи відліку Ax , зміщеної відносно системи Ox (рис.2) на величину $a=OA$ і розглядати задачу Фламана, як окремий випадок задачі Мітчела про визначення полів напружень і деформацій в тонкому необмеженому клині з кутом 2α , до вершини якого прикладена сила $G/2$, що складає з віссю клина Ax' кут $\beta=0$ [6].

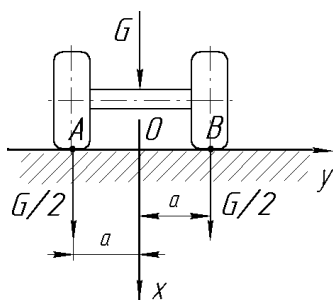


Рис. 1. Схема навантаження на грунт парою колісних рушіїв

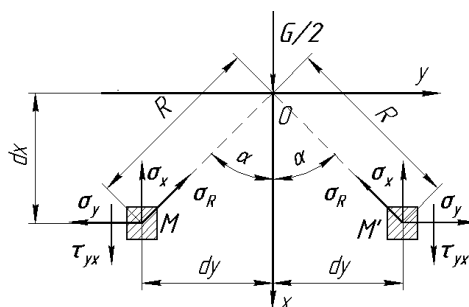


Рис. 2. Схема визначення полів напружень для зосередженої сили:

σ_x, σ_y – головні напруження, σ_R – радіальне напруження, τ_{xy} – дотичне напруження, R – відстань від точки прикладання зосередженої сили до досліджуваної елементарної площинки

Для зосередженої сили перпендикулярної до осі x (рис. 2) маємо [3, 4, 6, 7]:

$$\sigma_R = \frac{2P}{\pi R} \cos \alpha l . \tag{1}$$

Перейшовши до декартових координат отримаємо:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_R \cos^2 \alpha; \\ \sigma_y = \sigma_R \sin^2 \alpha; \\ \tau_{yx} = \sigma_R \sin \alpha \cos \alpha. \end{cases} \tag{2}$$

Якщо ж врахувати, що на середовище діє дві зосереджені сили $G/2$, перпендикулярні до осі x (рис. 1), то для точки A : $y_A=y-a$; а для точки B : $y_B=y+a$. І, як наслідок, після відповідних перетворень рівняння 2 набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \frac{G}{\pi} \left(\frac{x^3}{[x^2 + (y-a)^2]^2} + \frac{x^3}{[x^2 + (y+a)^2]^2} \right); \\ \sigma_y = \frac{G}{\pi} \left(\frac{x(y-a)^2}{[x^2 + (y-a)^2]^2} + \frac{x(y+a)^2}{[x^2 + (y+a)^2]^2} \right); \\ \tau_{yx} = \frac{G}{\pi} \left(\frac{x^2(y-a)}{[x^2 + (y-a)^2]^2} + \frac{x^2(y+a)}{[x^2 + (y+a)^2]^2} \right). \end{array} \right. \quad (3)$$

Напруження в масиві ґрунту лінійно залежать від прикладених сил, тобто при збільшенні їх в n разів напруження збільшуються також в n разів. Якщо до поверхні масиву прикладено декілька зосереджених сил, то напруження в будь-якій точці будуть дорівнювати сумі напружень від кожної з цих сил окремо.

Для побудови математичної моделі напруженого стану від навантаження декількома блоками розподіленого навантаження останнє представимо як, суперпозицію N сил прикладених у відповідних точках:

$$\begin{aligned} x &= 0; & y_1 &= a; \\ y_2 &= a + da; \\ y_3 &= a + 2da; \\ &\dots\dots\dots; \\ y_n &= a + (n-1)da. \end{aligned} \quad (4)$$

Виходячи з (4) одержуємо математичну модель напруженого стану від декількох блоків розподіленого навантаження (рис.3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_z = \frac{G}{\pi} \left(\sum_{i=0}^n \frac{k_i x^3}{[x^2 + (y-a-i\Delta a)^2]^2} + \sum_{i=0}^n \frac{k_i x^3}{[x^2 + (y+a+i\Delta a)^2]^2} \right); \\ \sigma_y = \frac{G}{\pi} \left(\sum_{i=0}^n \frac{k_i x (-y-a-i\Delta a)^2}{[x^2 + (y-a-i\Delta a)^2]^2} + \sum_{i=0}^n \frac{k_i x (y+a+i\Delta a)^2}{[x^2 + (y+a+i\Delta a)^2]^2} \right); \\ \tau_{yx} = \frac{G}{\pi} \left(\sum_{i=0}^n \frac{k_i x^2 (y-a-i\Delta a)}{[x^2 + (y-a-i\Delta a)^2]^2} + \sum_{i=0}^n \frac{k_i x^2 (y+a+i\Delta a)}{[x^2 + (y+a+i\Delta a)^2]^2} \right); \end{array} \right. \quad (5)$$

де n – умовна кількість сил в блоці розподіленого навантаження:

k_i – ваговий коефіцієнт.

З відношення (5) можна побудувати відповідно – перший інваріант повного тензора напружень (шаровий тензор напружень, який і характеризує зміну об'єму досліджуваного середовища під парою рушіїв) як:

$$I_1 = H_h = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y; \quad (6)$$

та максимальне зсувне напруження в заданій точці:

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2}. \quad (7)$$

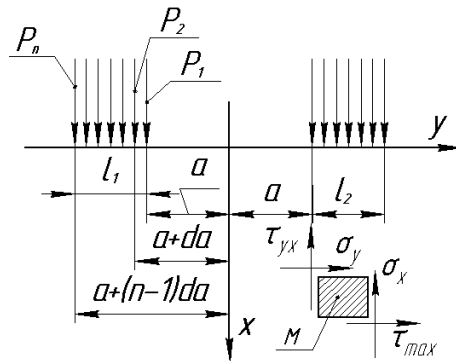


Рис. 3. Схема визначення напружень в елементарному об'ємі напівпростору, навантаженого двома блоками розподіленого навантаження (парою колісних рушіїв)

Одержані розв'язки дають змогу реалізувати числовий модельно-імітаційний експеримент для дослідження напружено-деформованого стану ущільнюваного профілю ґрунту, з метою подальшої оптимізації геометричних параметрів колісного рушія мобільної сільськогосподарської техніки, для досягнення мінімально можливого рівня інтенсивності ущільнення ґрунтового середовища, тобто $\sigma_x + \sigma_y \rightarrow \min$ та $\tau_{\max} \rightarrow \min$ [5, 7].

Оптимізація конструкційно-експлуатаційних параметрів колісних рушіїв (на прикладі трактора Т-150К). Величина ширини плями контакту рушія з ґрунтом може бути обчислена за формулою [1]:

$$2b = 2\sqrt{h_x(B - h_x)}, \quad (8)$$

де B – ширина профілю шини, м

h_x – нормальний прогин арки шини [1], м

З урахуванням того, що ширина $2b$ плями контакту дорівнює ширині l_i ділянки до якої прикладене розподілене навантаження розв'язок системи 3, дозволяє встановити динаміку рівня інтенсивності ущільнення ґрунтового середовища за глибиною $h=x$, залежно від ширини $2b$ плями контакту (табл. 1).

Таблиця 1. Розрахунок нормальних та зсувних напружень (тиск в шині $p_w=0,08$ МПа, навантаження на кожен рушій $G/2=28$ кН)

Глибина Н, м	Ширина 2b плями контакту, м									
	0,4		0,45		0,50		0,55		0,60	
	$\sigma_x+\sigma_y$, МПа	τ_{yz} , кПа	$\sigma_x+\sigma_y$, МПа	τ_{yz} , кПа	$\sigma_x+\sigma_y$, МПа	τ_{yz} , кПа	$\sigma_x+\sigma_y$, МПа	τ_{yz} , кПа	$\sigma_x+\sigma_y$, МПа	τ_{yz} , кПа
0,05	0,143	23,5	0,131	21,4	0,119	19,8	0,110	18,5	0,103	17,4
0,1	0,115	21,3	0,111	19,2	0,104	17,5	0,097	16,1	0,091	15
0,2	0,087	18,1	0,083	16,8	0,081	15,6	0,076	14,5	0,073	13,6
0,3	0,067	15,1	0,064	14,3	0,063	13,6	0,062	12,9	0,061	12,2
0,4	0,053	12,7	0,052	12,3	0,052	11,8	0,051	11,4	0,050	11

Враховуючи, що межа текучості мінерального дерново-підзолистого ґрунту, яка не призводить до невідновлюваних змін структурного стану насінневого шарів ґрунту (визначена експериментально), становить для шару ґрунту 0...10см $\sigma_f=0,113$ МПа. Допустимі дотичні напруження становлять $\tau=21$ кПа [7, 10] Проаналізувавши дані табл.1 можна встановити, що при навантаженні на рушій до 28кПа ширина плями контакту повинна відповідати умові:

$$2b \geq 0,55 \text{ м.} \tag{9}$$

Для вибору типу шин, що задовольняють вимозі 9, необхідно проаналізувати нормальні і відносні прогини шин та ширину плями контакту залежно від тиску в шині.

Проаналізувавши залежності на рис. 4, отримуємо систему:

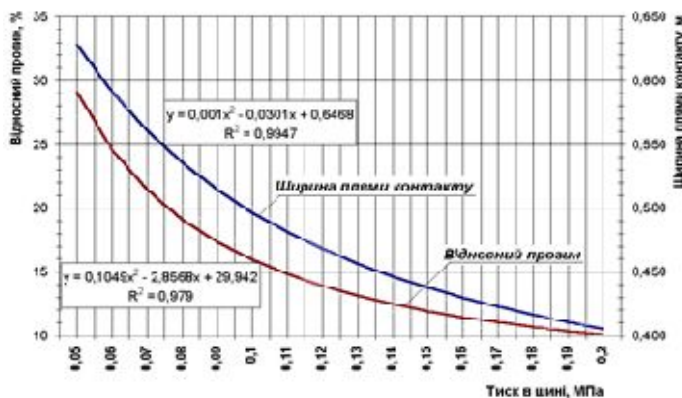


Рис. 4. Залежність зміни ширини плями контакту та відносного прогину від тиску для колісного рушія

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{h_x}{H_{ш}} = 0,105k^2 - 2,857k + 29,94; \\ 2b = 0,001k^2 - 0,03k + 0,647; \\ \frac{h_x}{H_{ш}} \leq 20\%; \\ 2b \geq 0,55; \\ p_w = 0,01k + 0,04, \end{array} \right. \quad (10)$$

де, $h_x/H_{ш}$ – відносне значення прогину (відповідно до ГОСТ 7463-80 варіює в межах 17...20%), $2b$ – ширина плями контакту шини з поверхнею ґрунтового середовища, м; k – коефіцієнт відповідності; p_w – тиск в шині рушія, МПа.

Розв'язавши систему 10 отримаємо оптимізовані параметри рушія, використання якого не призводить до невідновлюваних змін структурного стану насіннєвих прошарків ґрунту (табл. 2).

Таблиця 2. Оптимізовані параметри колісного рушія

Параметр	Позначення	Розмірність	Значення
Тиск в шині	p_w	МПа	0,073
Ширина плями контакту	$2b$	м	0,553
Відносний прогин	-	%	20

Враховуючи, що межа текучості мінерального дерново-підзолистого ґрунту, визначена експериментально, становить для шару ґрунту 0...10 см $\sigma_I=0,113$ МПа, аналіз результатів числового експерименту свідчить, що застосування для трактора *T-150K* шини 28,1R26 за експлуатаційного тиску 0,073 МПа не призводить до невідновлюваних змін структурного стану кореневих шарів ґрунту.

Аналітичне визначення шкідливого впливу колісних рушіїв машинно-тракторних агрегатів на ґрунтове середовище.

У результаті розв'язку системи 5 та комп'ютерного аналізу, напружено-деформованого стану ґрунту під дією колісних рушіїв, отримані епюри суми головних напружень у ґрунті під передніми (рис.5а) та задніми рушіями (рис.5б) трактора *T-150K* оснащеного шинами 28,1R26 для оптимізованого тиску ($p_w=0,073$ МПа).

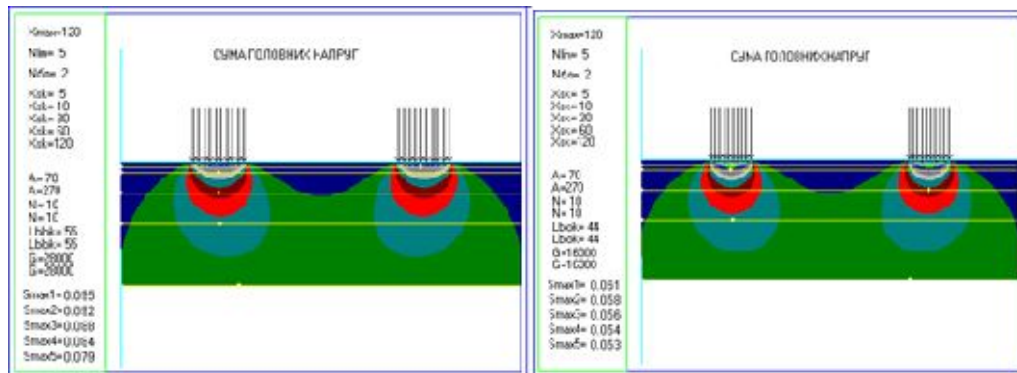


Рис. 5. Епюра суми головних напружень у ґрунті під рушіями трактора Т-150К, оснащеного шинами 28,1R26 для оптимізованого тиску ($p_w=0,073\text{МПа}$): а – передні рушії, б – задні рушії

Середнє значення нормальних напружень $\sigma_{сеп}$ можна визначити за допомогою подвійного інтегралу:

$$\begin{aligned} \sigma_{сеп} &= \frac{1}{S_e} \iint_{S_e} \sigma_I(x, y) dS = \\ &= \frac{1}{h_{max}} \cdot \frac{b}{2} \int_0^{h_{max}} dx \int_{-\frac{b}{4}}^{\frac{b}{4}} \sigma_I(x, y) dy, \end{aligned} \quad (11)$$

де $\sigma_I(x, y)$ – визначає суму нормальних напружень в т. $M(x, y)$ і відповідає сумі перших двох рівнянь системи 5; h_{max} – максимальна глибина обробітку, м ($h_{max}=0,12\text{м}$); b – ширина захвату агрегату, м; S_e – площа поперечного перерізу ґрунтового середовища на яке діють підвищені нормальні напруження, м².

Площу поперечного перерізу S_e ґрунтового середовища на яке діють підвищені нормальні напруження σ_I та середнє їх значення, визначали з урахуванням рівнянь за допомогою спеціально розробленої програми графічного сканування [8].

Згідно з [2, 6, 7] щільністю ґрунту з початковою щільністю ρ , після проходження колеса, чи гусениці можна описати логарифмічною залежністю:

$$\rho = \rho_0 + c \ln \sigma_I, \quad (12)$$

де c – константа, яка визначається в результаті практичних досліджень (для дерново-підзолистого ґрунту середньої ступені оглеєння $c=7..10$).

Для характеристики шкідливого впливу на ґрунтове середовище колісних рушіїв доцільно ввести показник (коефіцієнт) шкодочинності:

$$k_{ш} = \frac{\rho_{сеп}}{\rho_{опт}}, \quad (13)$$

де ρ_c – середнє значення щільності після проходження передніх та задніх рушіїв, $кг/м^3$;

$\rho_{опт}$ – значення оптимальної щільності ($\rho_{опт}=1200 кг/м^3$).

Таблиця 3. Параметри ґрунтового середовища в зоні дії рушіїв

	Середня сума нормальних напружень, МПа	Площа на якій вона діє, $м^2$	Середня щільність ґрунту, $кг/м^3$	Коефіцієнт шкодочинності
Передній рушій	0,03	0,72	1292	1,08
Задній рушій	0,02	0,72	1371	1,14

Одним із найбільш дієвих способів ущільнення ґрунту є використання комбінованих агрегатів [9, 10]. Очевидно, що із збільшенням глибини обробітку коефіцієнт шкодочинності $k_{ш} \rightarrow 0$, однак зростає опір ґрунту $R_z \rightarrow \max$, та як наслідок, підвищується витрата пального і зменшується продуктивність роботи. Тому необхідно встановити оптимальну глибину обробітку, з дотриманням наступних вимог:

$$\begin{cases} R_z = rab \rightarrow \min; \\ k_{ш} = \frac{\rho_{сеп}}{\rho_{опт}} \rightarrow 1. \end{cases} \quad (14)$$

де r – питомий опір ґрунту (для комбінованих агрегатів типу: “Сера-6000”, “Європак”,

АМО-7,5 $r=50\dots75кПа$); a – глибина обробітку ($a \leq 0,12 м$); b – ширина захвату ($b=6\dots7,2 м$)

Значення R_z та $k_{ш}$, для різних глибин обробітку, встановленні аналітично (згідно з системою 14) наведені на рис.6.

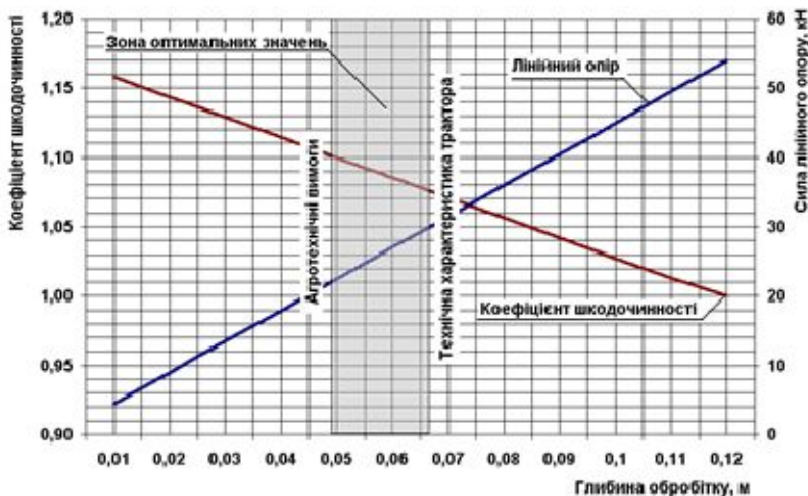


Рис. 6. Визначення зони оптимальних значень глибини обробки комбінованого культиватора ($r=75$ кПа, $\rho_{opt}=1200$ кг/м³)

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. На підставі розв'язку задачі Фламана, розробленого в теорії пружності, створена математична імітаційна модель напруженого стану ґрунту в умовах його навантаження декількома блоками розподілених навантажень, яка дає змогу оптимізувати конструкційно-експлуатаційні параметри шин колісних рушіїв, для зменшення їх ущільнюючої дії на ґрунт.

2. Розроблена числова імітаційна модель для дослідження напружено-деформованого стану ґрунту під колісними рушійми трактора Т-150К є універсальною, і дозволяє виконувати оптимізаційні дослідження колісних рушіїв будь-якого типорозміру для широкої гами мобільних енергетичних засобів системи машин в цілому.

3. Встановлено, що гранична величина суми головних напружень σ_1 у ґрунті, з огляду на запобігання ущільнюючої дії колісного рушія трактора Т-150К, не повинна перевищувати значення 0,113МПа для мінерального дерново-підзолистого слабооглеєного сугищеного ґрунту.

4. Для виконання основних технологічних операцій трактором Т-150К, його рушії доцільно оснащувати шинами 28,1R26, які зумовлюють такі основні установки: ширина колії збільшується з 1,86м до 2,0м, робочий тиск у шині $p_w=0,073$ МПа, рівень суми головних напружень під рушієм трактора $\sigma_n=0,1127<0,113$ (МПа).

5. Для визначення шкідливого впливу колісних рушіїв на ґрунт встановлено коефіцієнт шкодочинності, як відношення оптимальної щільності ґрунту до його середньої щільності після обробки.

6. Оптимальною є глибина обробітку 5...6 см, при якій забезпечується виконання агротехнічних вимог стосовно щільності насінневого шару ґрунту, та забезпечується номінальне завантаження трактора класу тяги 3. Крім того, можливі налагодження комбінованого агрегату на збільшену глибину обробітку по колії трактора (що на 3...5% знижує коефіцієнт шкодочинності).

Пропонована модель дозволить, у подальшому, проводити дослідження впливу на ґрунтове середовище широкого ряду типорозмірів колісних рушіїв, із використанням комп'ютерної техніки.

Література

1. *Бойков В. П.* Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин / *В. П. Бойков, В. Н. Белковский.* – М. : Агропромиздат, 1988. – 240 с.
 2. *Водяник И. И.* Распределение давления тракторного колеса на почву / *И. И. Водяник* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981. – № 4 – С. 44–46.
 3. *Забродський П. М.* Структура ґрунту і вплив на неї механіко-технологічних факторів / *П. М. Забродський* // Числові імітаційні моделі в агротехнологічній механіці ґрунтів. – Житомир: ПМАН, 1996. – С. 14.
 4. *Забродський П. М.* Аналітичні дослідження напружено-деформованого стану ґрунту під дією дискового робочого органу / *П. М. Забродський, І. Г. Грабар* // Числові імітаційні моделі в агротехнологічній механіці ґрунтів. – Житомир : ПМАН, 1996. – С. 47–59.
 5. *Гольдштейн М. Н.* Механические свойства ґрунтов / *М. Н. Гольдштейн.* – М. : Изд-во литературы по строительству, 1971. – 368 с.
 6. *Кулен А.* Современная земледельческая механика / *А. Кулен, Х. Куиперис*; пер. с англ. *А. Э. Габриэляна*; под ред. и с предисл. *Ю. А. Смирнова.* – М. : Агропромиздат, 1986. – 349 с.
 7. *Кушнарєв А. С.* Механико-технологические основы обработки почвы / *А. С. Кушнарєв, В. И. Кочев.* – К. : Урожай, 1989. – 144 с.
 8. Надійність роботи ґрунтообробного знаряддя з “кільцевими” ротаційними робочими органами за наявності у них технологічних тріщин / *Б. А. Шелудченко, В. О. Шубенко, С. М. Кухарець* [та ін.] // Вісн. держ. агрокол. акад. України. – 1999. – № 1–2. – С. 124–129.
 9. *Пупонин А. И.* Агротехнические способы снижения уплотнения дерново-подзолистых почв / *А. И. Пупонин, Н. С. Матюк, Г. Г. Манолій* // Плодородие почв и его изменение при уплотнении и разуплотнении: Науч. тр. почв. ин-та им. *В. В. Докучаева.* – Х., 1984. – С. 51–52.
 10. *Шелудченко Б. А.* Агромеханіка ґрунтів / *Б. А. Шелудченко* – Житомир : Полісся, 1992. – 249 с.
-