УДК 631.31

РОЗРАХУНОК СИЛИ ОПОРУ ДЕФОРМАЦІЇ ҐРУНТУ ПІД ДІЄЮ РОБОЧОГО ОРГАНА ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА

Ю. Лабатюк, м. н. с., Е. Алієв, к. т .н., зав. лаб.
Інститут олійних культур НААН України

Постановка проблеми. Механічна обробка ґрунту виконує однаково важливу роль у формуванні врожаю на всіх ґрунтах за звичайних погодних умов. Механічна обробка ґрунту – це процес взаємодії між робочими органами машин (знарядь) і ґрунтом. Механічна обробка ґрунту означає, що ґрунт деформується під дією сил, що виникають у процесі взаємодії робочих органів знаряддя з ґрунтом. При створенні знарядь можна змінювати розмір і форму поверхні робочих органів, а отже, й сили, що діють на ґрунт. Реакція ґрунту на прикладене зусилля є опором ґрунту обробці. Реакція робочого органа на дію ґрунту – це сили вздовж поверхні контакту робочого органа, які розповсюджуються від поверхні контакту вглиб, викликаючи спочатку ущільнення, а потім руйнування ґрунту залежно від його вологості та механічного складу. Окремою задачею є створення математичної моделі процесу взаємодії робочих органів із ґрунтовим середовищем, яке виникло за рахунок довготривалого зрошування, що призвело до розподілу пошарової щільності ґрунтів та високої їхньої неоднорідності [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведені дослідження [2] напруженого стану ґрунту під дією робочих органів не забезпечили отримання практичних результатів. Численні спроби застосування методів досліджень [3] пружних матеріалів щодо аналізу напружень у ґрунті також не дали результатів, оскільки залежність між силою, що діє на ґрунт, і деформацією ґрунту є функцією стану ґрунтового середовища. На жаль, у всьому світі мало приділяється уваги дослідженням зміни властивостей ґрунту рід дією механічної обробки. У дослідженнях взаємодії робочих органів з ґрунтом при механічній обробці прийнято фіксувати деякі фізико-механічні характеристики ґрунту, від яких залежать результативність і характер цієї взаємодії: вологість ґрунту; твердість і міцність ґрунту; тертя ґрунту об поверхню робочого органа під час руху; важкість обробки ґрунту; абразивні властивості ґрунту. Практично всі властивості ґрунту, у тому числі й перелічені вище, залежать від його вологості.

Постановка завдання. Наше завдання – дослідити процес пошарової (I шар – 0-15 см, II шар – 15-0,25 см, III шар – 25-40 см) деформації ґрунтового середовища робочими органами ярусного глибокорозпушувача.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо процес взаємодії робочого органа глибокорозпушувача (чизеля) зі шаром ґрунту. Робочий орган глибокорозпушувача являє собою двогранний клин. За даними [4], значення сили опору двогранного клина дорівнює:

$$F = \sum F_{\text{тер.}} + F_{\text{деф.}}, \qquad (1)$$

де $\Sigma F_{тер.}$ – сумарна сила опору ґрунту від сил тертя, Н;

$F_{деф.}$ – сила опору деформації ґрунту, Н.

За роботи клина в однорідному за властивостями ґрунті складова $\Sigma F_{тер.}$ має постійне значення, а $\Sigma F_{деф.}$ періодично змінюється від нуля до деякого максимального значення, що зумовлено циклічним характером деформації ґрунту під дією клина. Характер зміни сили опору деформації ґрунту залежить від його фізико-механічних властивостей і вологості. За даними експериментальних досліджень [5] приймаємо, що динамічна сила опору деформації ґрунту змінюється за законом синуса (рис. 1).

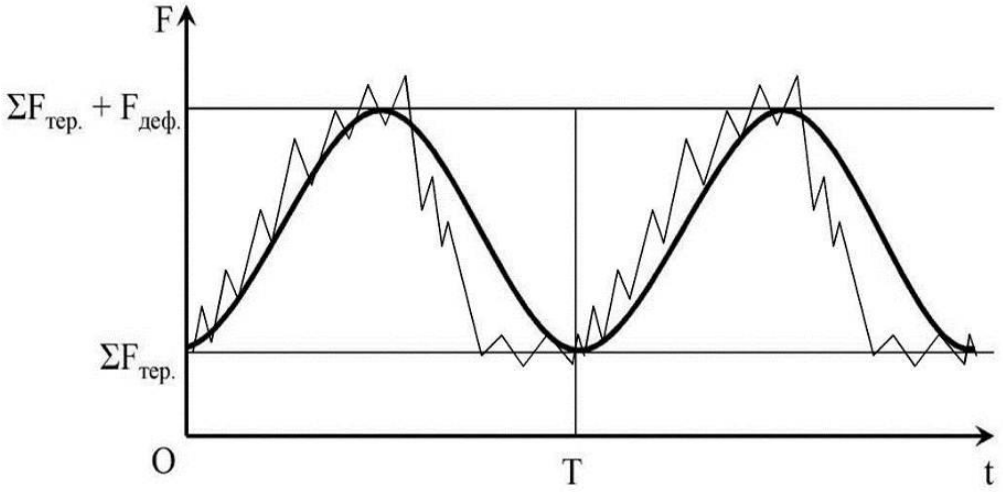


Рис. 1. Динамічна залежність сили опору деформації ґрунту:
1 – експериментальні дані досліджень, 2 – лінія апроксимації.

При цьому процес «стиснення-руйнування» швидкоплинний і за певних умов клин може перейти в стан ударного навантаження. Учені А.Н. Гудков, Г.А. Дегтраф, К.Г. Арутюнян, В.В. Кацигін, Ю.Ф. Новиков [6] і низка інших дослідників питання взаємодії робочих органів із ґрунтом розглядають з урахуванням швидкостей поширення напружень і деформацій у ґрунті.

У вузькому діапазоні варіювання швидкості залежність між напруженістю опору ґрунту і швидкістю деформації може бути описана лінійним рівнянням [7]:

$$\sigma = \sigma_n \left(1 + K_р V\right), \tag{2}$$

де σ – напруженість опору ґрунту, Па;

$K_р$ – коефіцієнт релаксації ґрунту, $К_р$ = 0,25 с/м;

V – швидкість деформації ґрунту (швидкість руху трактора), м/с;

σ_n – миттєве напруження опору ґрунту, Па.

Тому напружений стан у ґрунті залежить не тільки від значення деформації, а й від швидкості, з якою розвивається процес деформації. З цього можна зробити

висновок, що ударне прикладення навантажень на ґрунт викликає вищі напруження. При цьому межі його міцності при руйнуванні підвищуються.

Для визначення миттєвого напруження опору ґрунту розглянемо елементарну ділянку, на яку діють нормальні і дотичні напруження (рис. 2).

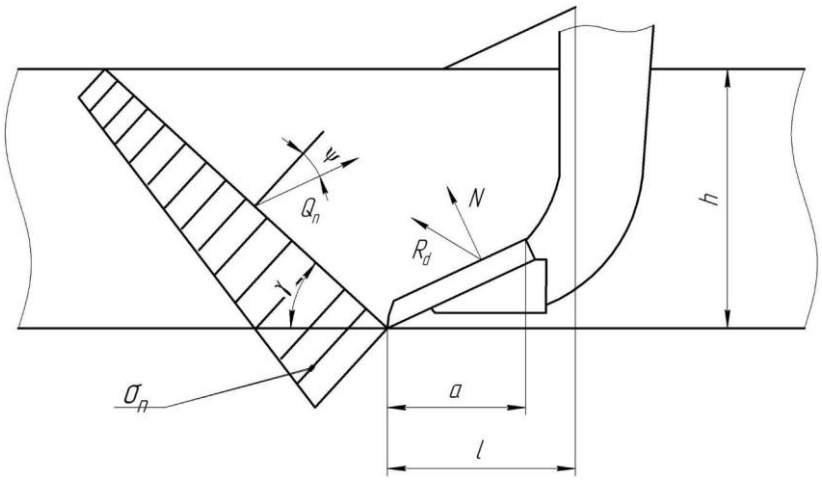


Рис. 2. Схема дії напружень на елементарну ділянку ґрунту:
γ – кут зсуву ґрунту у поперечному напрямі; σ_n – гранична рівновага; R_d – рівнодійна сила; N_n – сила нормальної реакції.

Напруження в точках області граничної рівноваги для елементарної площини ґрунту визначається системою п’яти рівнянь [8]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\sigma_x}{\partial x}+\dfrac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}=\rho\cdot g, \\ \dfrac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}-\dfrac{\partial\sigma_y}{\partial y}=0, \\ \dfrac{\left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+4\tau_{xy}^2}{\left(\sigma_x+\sigma_y+2C_0\operatorname{ctg}\psi\right)^2}=\sin^2\psi, \\ \tau_n=\sin\psi\sqrt{\dfrac{1}{4}\left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+\tau_{xy}^2}, \\ \sigma_n=\dfrac{1}{2}\left(\sigma_x+\sigma_y\right)-\cos\psi\sqrt{\dfrac{1}{4}\left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+\tau_{xy}^2}, \end{cases} \qquad (3)$$

де τ_{xy} – дотичне напруження опору ґрунту, Па;
σ_x, σ_y – нормальне напруження вздовж осей О*x* і О*y* відповідно, Па;
τ_n – граничне дотичне напруження опору ґрунту, Па;
C_0 – коефіцієнт зчеплення ґрунту, Па;
ψ – кут внутрішнього тертя ґрунту, рад;

γ – об'ємна вага ґрунту, Н/м^3;

$$\gamma = \rho \cdot g, \tag{4}$$

ρ – щільність ґрунту, кг/м^3;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2.

Згідно з експериментальними дослідженнями [9], коефіцієнт зчеплення C_0 і кут внутрішнього тертя ψ ґрунту залежать від його вологості W_0:

$$C_0 = -2{,}25 \cdot 10^{-4} W_0^3 + 1{,}37 \cdot 10^{-2} W_0^2 - 1{,}99 \cdot 10^{-2} W_0, \tag{5}$$

$$\psi = -4{,}13 \cdot 10^{-4} W_0^2 + 1{,}66 \cdot 10^{-2} W_0 + 4{,}51 \cdot 10^{-1}, \tag{6}$$

де W_0 – вологість шару ґрунту, %.

Відповідно до рівняння Кулона–Мора, опір зсуву по визначеній поверхні руйнування лінійно залежить від нормального напруження ґрунту:

$$|\tau_n| = C_0 + \sigma_n \operatorname{tg}\psi \ . \tag{7}$$

Однак використання методу Кулона–Мора для визначення граничної рівноваги дає великі похибки. Точніші результати забезпечує метод, розроблений В.В. Соколовським, який полягає в наступному [8]. Умову граничного опору, що передує руйнуванню ґрунту, можна записати в такому вигляді:

$$\max\left\{|\tau| - \left(C_0 + \sigma_n \operatorname{tg}\psi\right)\right\} = 0. \tag{8}$$

Система рівнянь (3) і (8) характеризує граничний стан і обрис лінії ковзання. Однак в явному вигляді ці рівняння дуже важко розв'язати, тому скориставшись програмним пакетом Maple 16 з використанням методів чисельного обчислення систем диференціальних рівнянь у часткових похідних отримали значення миттєвих напружень опору ґрунту для кожного шару ґрунту:

– I шар (ρ = 1430-1460 кг/м^3, W_0 = 9-11%) σ_n = 30,8-50,9 кПа ;
– II шар (ρ = 1340-1560 кг/м^3, W_0 = 24-26%) σ_n = 170,1-183,5 кПа;
– III шар (ρ = 1280-1390 кг/м^3, W_0 = 14-16%) σ_n = 105,1-129,3 кПа.

Провівши моделювання взаємодії робочого органа глибокорозпушувача з ґрунтом у програмних пакетах Solid Works 2013 і PLAXIS, отримали розподіл напруженості на робочий орган і шлях зминання ґрунту (рис. 3):

– I шар (ρ = 1430-1460 кг/м^3, W_0 = 9-11%) l = 1,01-1,23 м;
– II шар (ρ = 1340-1560 кг/м^3, W_0 = 24-26%) l = 0,83-0,96 м;
– III шар (ρ = 1280-1390 кг/м^3, W_0 = 14-16%) l = 0,44 -0,56 м.

Враховуючи рис. 2 і рівняння (1) і (2), остаточно маємо:

$$F = \sum F_{\text{тер.}} + F_{\text{деф.}}^{\max} \sin \omega t, \tag{9}$$

де $F_{\text{деф.}}^{\max}$ – максимальна сила опору деформації ґрунту, Н;

$$F_{\text{деф.}}^{\max} = \sigma \cdot l \cdot a \cdot \sin\alpha; \tag{10}$$

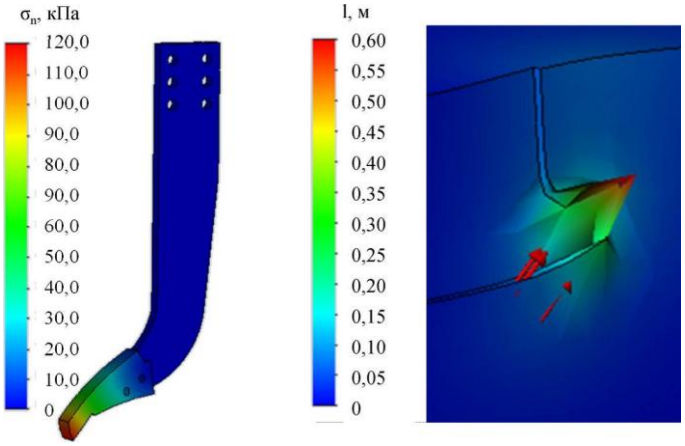
l – шлях зминання ґрунту, м;

a – довжина робочої частини розпушувальної лапи робочого органа, м;

α – кут кришення лапи робочого органа, рад;

ω – частота зміни сили опору деформації ґрунту, с$^{-1}$;

$$\omega = \frac{V}{l} \cdot \qquad (11)$$



а) б)

Рис. 3. Моделювання взаємодії робочого органа глибокорозпушувача з ґрунтом у програмних пакетах Solid Works 2013 (а) і PLAXIS (б).

Висновки. 1. Одержана механіко-математична модель процесу взаємодії робочого органа глибокорозпушувача з ґрунтом пов'язала між собою напруження опору і шлях зминання ґрунту від його фізико-механічних властивостей (щільність та вологість).

2. За результатами розрахунку механіко-математичної моделі були отримані значення напружень опору σ_n і шляху зминання ґрунту l для кожного його шару:

- I шар (ρ = 1430-1460 кг/м^3, W_0 = 9-11%) σ_n = 30,8-50,9 кПа, l = 1,01-1,23 м;
- II шар (ρ = 1340-1560 кг/м^3, W_0 = 24-26%) σ_n = 170,1-183,5 кПа, l = 0,83-0,96 м;
- III шар (ρ = 1280-1390 кг/м^3, W_0 = 14-16%) σ_n = 105,1-129,3 кПа, l = 0,44-0,5 м.

Бібліографічний список

1. Шевченко И. А. Обоснование геометрических параметров ступенчатых рабочих органов глубокорыхлителей для почв юга Украины : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Шевченко Игорь Аркадьевич. – М., 1987. – 20 с.
2. Горячкин В. П. Теория разрушения почв : собр. соч. / В. П. Горячкин. – М. : Колос, 1968. – Т. 2. – С. 335-382.
3. Зеленин А. Н. Основы розрушения грунтов механическим способом / А. Н. Зеленин. – М. : Машиностроение,1968. – 376 с.
4. Kushnarev A. Ways of improvement of stability of tillage tools with spring shanks moving in depth / A. Kushnarev, I. Shevchenko // ASAE (94–D–027), EurAgEng “Power, Machinery and mechanization”. – Belgium : CIGR, 1994. – Vol. 2. – P. 495-499.
5. Синеоков Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Синеоков Г. Н., Панов И. М. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
6. Гудков А. Н. Теоретические положения к выбору новой системы машин для обработки почвы / А. Н. Гудков // Земледельческая механика. – М. : Машиностроение,1969. – 168 с.

7. Виноградов В. И. Сопротивление почвы смятию в зависимости от скорости деформации / В. И. Виноградов // Механизация сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1985. – Вып. 43.-4.2. – С. 11-17.
8. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М. : Гостехиздат, 1954. – 243 с.
9. Евстифеев Д. В. Исследование параметров грунта при его прямом сдвиге [Электронный ресурс] / Д. В. Евстифеев, Г. П. Дроздовский, Н. Р. Шоль. – Режим доступа : http://science-bsea.narod.ru/2005/mashin_2005/evstifeev_issled.htm.

Лабатюк Ю., Алієв Е. Розрахунок сили опору деформації ґрунту під дією робочого органа глибокорозпушувача

Одержана механіко-математична модель процесу взаємодії робочого органа глибокорозпушувача з ґрунтом. Визначені значення напружень опору і шляху зминання ґрунту для різних його шарів.

Ключові слова: ґрунт, глибокорозпушувач, механіко-математична модель, напружений стан, зминання.

Labatyuk Yu., Aliev E. Calculating the force of resistance to deformation of soil under working body chisel

Received mechanical-mathematical model of the interaction of the working body subsoilers with the ground. The values of the intensity and path collapsing soil for its various layers.

Key words: soil, deep, mechanical-mathematical model, stress, collapse.

Лабатюк Ю., Алиев Е. Расчет силы сопротивления деформации почвы под действием рабочего органа глубокорыхлителя

Получена механико-математическая модель процесса взаимодействия рабочего органа глубокорыхлителя с почвой. Определены значения напряженности сопротивления и пути смятия почвы для разных ее слоев.

Ключевые слова: почва, глубокорыхлитель, механико-математическая модель, напряженное состояние, смятие.