

УДК 163.311:631

## ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ ГРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ВЗАЕМОДІЇ ЙОГО З РОБОЧИМ ОРГАНОМ

Сірий І.О., асп. \*

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

м. Мелітополь

Тел. +380619421265

**Анотація.** В статті на підставі аналізу існуючих моделей ґрунтового середовища визначена найбільш відповідна модель, при вирішенні задач взаємодії робочого органу із ґрунтом. Обґрунтована найбільш раціональна теорія міцності, що дозволяє дослідити питання взаємодії ґрунтового середовища та робочого органу.

**Ключові слова:** робочий орган, ґрунтове середовище, напруження, деформації, теорія Кулона-Мора.

*Постановка проблеми.* Дослідження процесів механічної взаємодії ґрунтообробних робочих органів та ґрунту являють собою складні багатofакторні процеси. Теоретичне дослідження властивостей процесів механічної взаємодії ґрунтообробних робочих органів та ґрунту традиційними способами ускладнено, але при цьому воно є необхідною умовою при створенні нових ґрунтообробних робочих органів. При чисельному визначенні зазначених властивостей виникає необхідність в певній його моделі, яка повинна з максимальною точністю описувати протікаючи в ґрунті фізичні явища. Що в подальшому дозволить з достатньою точністю дослідити зазначений процес у теоретичному плані, та знайти шляхи зниження енергоємності та підвищення якості обробки ґрунту.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* При досить великому різноманітті моделей ґрунтового середовища, всі їх

---

\* Публікується за рекомендацією: д.т.н., проф., акад. МААО Дідур В.А.

можна звести до двох типів: дискретного та суцільного середовища [1]. Аналіз робіт в яких використовується дискретна модель ґрунтового середовища, наводить до висновків, що фізична модель ґрунту та його структура, процес формування макро- та мікроагрегатів, параметри взаємодії між частками та як наслідок закономірності їх зміни являють собою досить складні процеси, що відкидає можливість їх аналітичного опису з достатньою точністю. В силу чого на сьогоднішній день ґрунт як дискретне середовище до кінця не досліджений [2].

Беручи до уваги, що ґрунтове середовище має дискретну структуру, вчені досліджують його з точки зору безперервного континууму, тобто суцільного середовища, що пов'язане з уявленням щодо безперервного заповнення фрагменту простору [3;4].

Відображення ґрунтового середовища за допомогою моделі суцільного середовища має низку переваг, серед яких можливість застосування при описі його напружено-деформованого стану математичного апарату інтегральних та диференціальних обчислень.

При дослідженні процесу взаємодії ґрунтообробних знарядь з ґрунтом в плані фізико-математичного подання матеріального об'єкту, за допомогою якого вивчається процес обробки ґрунту, всі роботи можна узагальнюючи звести до чотирьох груп, при цьому ґрунт розглядається як: тверде тіло що деформується, суцільне пружне (пружно-в'язке або пружно-пластичне тіло) середовище, суцільне не стискуване сипке середовище, суцільне деформоване середовище.

*Мета дослідження.* Обґрунтування моделі ґрунтового середовища при дослідженні процесу взаємодії робочого органу та ґрунту. Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

1. Обґрунтувати оптимальну модель ґрунтового середовища.

2. На підставі оптимальної моделі ґрунтового середовища визначити раціональну теорію міцності.

3. На підставі обраної моделі ґрунтового середовища та теорії міцності дослідити напруження та деформації що виникають в зоні контакту робочого органу та ґрунтового середовища.

*Основна частина.* Розглянемо які гіпотези та припущення вводяться у кожному із чотирьох зазначених випадках фізико-математичного подання матеріального об'єкту при теоретичному дослідженні взаємодії робочого органу та ґрунтового середовища.

**1) Подання ґрунту як твердого тіла що деформується.**

В даному випадку ґрунт уявляється як тверде тіло що деформується, та володіє постійною щільністю. Вплив з боку клина здійснюється зі швидкістю  $v$ , та зводиться до рівнодіючої  $R$ . Типова розрахункова схема впливу робочого органу на ґрунт при такому поданні ґрунтового середовища наочно представлена на рис. 1. При цьому по лінії дії рівнодіючої  $R$  виникає та розвивається тріщина під деяким кутом  $\phi$ . Рівнодіюча сила  $R$  залежить від нормальної реакції поверхні клина  $N$ .

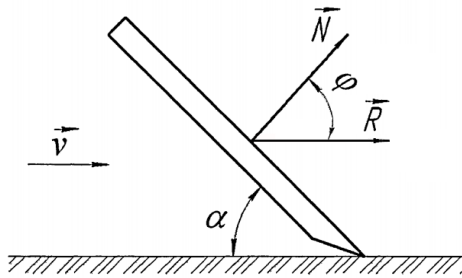


Рисунок 1 – Схема дії сил при поданні ґрунту у вигляді твердого тіла що деформується

Надалі рішення зазначеної задачі зводиться до визначення нормальної реакції поверхні клина  $N$ .

При дослідженні задач взаємодії ґрунтообробних робочих органів та ґрунту, подання ґрунту як твердого тіла що деформується не дає можливості в достатній мірі врахувати такі властивості як щільність, вологість, твердість, пористість, зчеплення та ін.

**2) Подання моделі ґрунту як суцільного пружного середовища.** Використання даної розрахункової схеми яка представлена на рис. 2, передбачає низку обмежень: шар ґрунту представляється у вигляді затисненої балки, при цьому розподіл тиску ґрунтообробного робочого органу на шар ґрунту

замінюється рівнодіючою силою  $R$ , яка прикладена в точці  $K$ . Під дією рівнодійної сили  $R$  виникає випереджальна тріщина  $AB$ , що призводить до появи епюри напружень в перерізі  $BC$ , а також її розподілу відповідно до закону трикутників на ділянці  $BK$ . При збільшенні напруження за межі критичних значень, спільні дії нормальних та дотичних напружень викликають руйнування оброблюваного шару ґрунту [5].

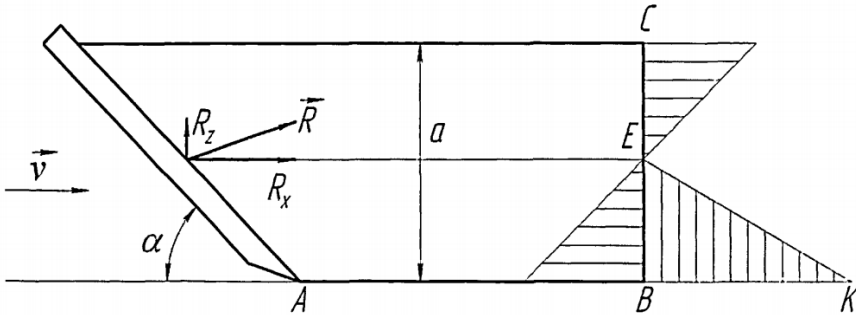


Рисунок 2 – Схема дії сил при поданні ґрунту у вигляді суцільного пружного середовища

Необхідною умовою застосування зазначеної схеми взаємодії ґрунтообробного робочого органу з ґрунтовим середовищем, є використання двох постійних, що повинні зв'язати напруження та деформації: як приклад, модуль зсуву  $G$  (коефіцієнт Пуассона) та модуль пружності  $E$  (модуль Юнга). Таким чином, взаємозв'язок між нормальними напруженнями  $\sigma$  та позовжніми деформаціями у випадку одновісного деформування  $\epsilon$ , а також між кутом зсуву  $\psi$  та дотичними напруженнями  $\tau$  приймає вигляд:

$$\sigma = E\epsilon; \tau = G\psi. \quad (1)$$

Використання моделі ґрунту у вигляді пружного суцільного середовища при вирішенні задач взаємодії ґрунтообробного робочого органу та ґрунту базується на використанні законів та положень теорії пружності. В даному випадку ґрунт розглядається як суцільне середовище, що не залежить від ґрунтової структури, та вивчаються оборотні пружні властивості ґрунту. При цьому використовують метод плоских перетинів, та приймають ряд спрощень теорії пружності що дозволяє звести рішення задач взаємодії робочих органів та ґрунту до вирішення задач опору

матеріалів. У розрахункові формули як наслідок вводяться необхідні міцнісні властивості ґрунту, наприклад опір ґрунту деформацій стиску, розтягу, вигину та зсуву.

**3) Використання моделі ґрунту у вигляді не стискуваного сипкого середовища.** У такій моделі ґрунтового середовища під дією робочого органу у ґрунті відбувається утворення поверхні ковзання ABC, яка задовольняє рівнянню міцності, наочно розрахункова схема представлена на рис. 3. Надалі розглядається рівновага сколеного блоку ґрунту OABC під дією наступних сил:  $G$  – вага сколеного блоку ґрунту,  $E_d$  – підпір стінки та  $E_n$  – рівнодіюча зовнішніх сил. При використанні моделі ґрунту у вигляді сипкого середовища приймається ряд припущень, на яких ґрунтується теорія граничної рівноваги: так ґрунт представляється як суцільне однорідне ізотопне середовище, опір деформаціям зсуву ґрунту при цьому не залежить від значення деформацій, а сколений блок ґрунту розглядається як абсолютно тверде тіло. Надалі розглядається рішення двох завдань [6]:

1. Встановлення параметрів конфігурацій лінії ковзання;
2. Встановлення параметрів рівноваги сколеного блоку як абсолютно твердого тіла.

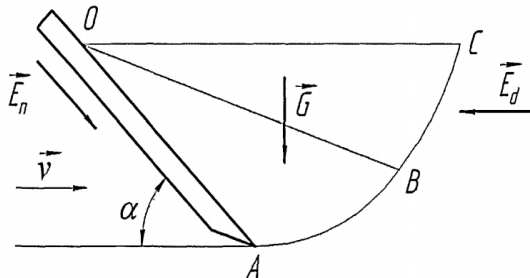


Рисунок 3 – Схема дії сил при поданні ґрунту у вигляді суцільного сипкого середовища

Аналіз проведених досліджень [7] свідчить про те, що прийняття до уваги тільки силових факторів процесу взаємодії ґрунтообробних робочих органів та такої моделі ґрунтового середовища є недостатнім. Для повного опису процесу необхідно враховувати деформації, що виникають в ґрунті. Використання теорії граничної рівноваги дозволяє вирішити завдання

пов'язані з визначенням поверхні руйнування ґрунтообробного робочого органу. У наслідок того, що деформація ґрунту не відбувається, його щільність також залишається незмінною.

**4) Подання ґрунту у вигляді деформованого суцільного середовища.** Прояв властивостей суцільного деформованого середовища виражається в характері взаємозв'язків між відповідними тензорами деформацій, напружень та часом [3;4;8]. Використання моделі ґрунту у вигляді суцільного деформованого середовища має вагомі переваги. Перш за все мова йде про можливість дослідження деформацій та напружень в мінімальних частинах тіла, з подальшим переходом до розгляду деформованого стану всього тіла. З аналітичної точки зору залежність між деформаціями що викликаються та напруженнями, що діють на тіло, а також їх змінами в часі називається реологічним рівнянням. Залежно від прийнятої гіпотези теорії деформованого тіла маємо ту, чи іншу схему зв'язку.

Слід зазначити що, ні прості, ні найскладніші комбінації реологічних моделей до яких приходять деякі вчені [3] не здатні відобразити реальні властивості ґрунту. Одним з найбільш вагомих факторів такої невідповідності є той факт, що рівняння, отримані на підставі реологічних моделей призводять до експоненціального, тобто до заздалегідь заданого вигляду кривих повзучості. При цьому слід відзначити, що експоненціальний вид рівняння різко обмежує можливості його застосування. В наслідок чого ряд дослідників приходять до застосування інтегральної форми рівняння деформування, в основі якої є закон спадкової повзучості Больцмана-Вольтерра.

Як приклад використання даного закону можна навести дослідження А.С. Кушнар'ова [8], який у якості моделі ґрунтового середовища приймає суцільне квазіоднорідне деформоване середовище. При цьому вводиться умова: для розгляду ґрунту як суцільного середовища мінімальна ширина перетину деформованої середі, де виникають напруження під дією зовнішніх сил, повинна бути більше діаметра ґрунтових агрегатів не менше ніж у 20 – 30 разів. Для розробки реологічної моделі ґрунту при експериментальному визначенні ядра повзучості за законом Больцмана-Вольтера необхідно розробити модель ґрунтового середовища у диференціальній формі. При подальшому вирішенні поставленої задачі необхідно визначити відповідну теорію міцності

(теорія Кулона-Мора) й реологічну модель, яка б передавала характер деформацій (модель Максвелла).

Є дослідники [3], що уявляють ґрунт схематично у вигляді однорідного деформованого середовища. При цьому висувають умови, яким неодмінно повинен відповідати процес взаємодії ґрунтообробного робочого органу та ґрунтового середовища: граничним умовам, диференціальним рівнянням рівноваги та рівнянням які описують механічні властивості. Математично подання механічних властивостей ґрунту має вигляд рівнянь залежності «напруження-деформація», а також умовою міцності:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_z}{dz} = \rho \frac{d^2U_x}{dt^2}; \\ \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_z}{dz} = \gamma + \rho \frac{d^2U_x}{dt^2}; \\ (\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau_{xz} = (\sigma_x + \sigma_z + 2C * ctg\varphi)^2 * \sin^2\varphi. \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $C$  – зчеплення ґрунту, Н/м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – кут внутрішнього тертя, град;

$\gamma$  – об'ємна маса ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup>.

Слід зауважити, стосовно реального процесу обробки ґрунту зазначена система рівнянь не вирішена.

Виконані дослідження переконливо доводять, що в умовах, коли об'єм деформованої зони середовища, що досліджується має великі поля напружень, то при розгляданні ґрунту як твердого дискретного тіла, та при поданні ґрунту як суцільного деформованого середовища, дає у кінцевому підсумку рівнозначні рішення [10].

Таким чином найбільш раціональним для визначення міцності ґрунту із достатнім ступенем достовірності є використання теорії міцності Кулона-Мора. У математичному вираженні її можна представити в наступному вигляді [5]:

$$\tau = C_0 \pm \sigma * tg\varphi, \quad (3)$$

де  $\tau$  – граничне дотичне напруження;

$C_0$  – опір ґрунту при чистому зсуві ( $\sigma = 0$ );

$\varphi$  – кут внутрішнього тертя.

Знайти залежність  $\tau = f(\sigma)$ , представляється можливим за допомогою отриманих в ході дослідів значень  $C_0$  та  $\varphi$ . В по-

дальшому завдання зводиться до побудови кругів Мора на діаграмі напружень безпосередньо в зонах стиску та розтягування, що дозволяє визначити значення  $\sigma_c$  та  $\sigma_p$ .

$$\sigma_c = 2 * C_0 * tg(45^\circ + \frac{\varphi}{2}), \quad (4)$$

$$\sigma_p = 2 * C_0 * tg(45^\circ - \frac{\varphi}{2}). \quad (5)$$

В такому випадку співвідношення  $\frac{\sigma_c}{\sigma_p}$  буде представлено у вигляді:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_p} = \frac{tg(45^\circ + \frac{\varphi}{2})}{tg(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}. \quad (6)$$

Таким чином, очевидним є те, що залежність між стискаючими та розтягувальними напруженнями, характеризується здебільшого значенням кута внутрішнього тертя ґрунту. Зазначена залежність є характеристикою співвідношення  $\frac{\sigma_c}{\sigma_p}$ , що знаходить застосування як в розрахунках, так і в практичному плані [5]. Слід відзначити, що підвищити якість обробки ґрунту при зниженні витрат енергії, дозволить форма робочого органу яка забезпечить здійснення обробки ґрунту за рахунок створення переважно деформацій розтягування, вигину та зсуву.

*Висновок.* При дослідженні напружено-деформованого стану руйнування ґрунту найбільш раціональним та інформативним є застосування теорії міцності Кулона-Мора. При цьому оптимальним є представлення його у вигляді суцільного середовища що деформується, так нормальна складова сил опору ґрунтообробного робочого органу виражається через нормальні напруження, що формуються на поверхні робочого органу. Також необхідно приймати до уваги різницю в фізико-механічних властивостях ґрунту.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Рахімов І. Р. Вдосконалення робочих органів машин для основного обробітку ґрунту на основі моделювання процесу взаємодії клина з ґрунтом : автореф. дисс ... канд. техн. наук : спец. 05.20.01 / І.Р. Рахімов – Челябінськ, 2006. – 29 с.

2. Нерпіна С.В., Чуднівський А.Ф. Фізика ґрунтів. - М. : Наука, 1967.-583 с.



3. Кушнар'ов А.С. Механіко-технологічні основи процесу впливу робочих органів ґрунтообробних машин та знарядь на ґрунт: дисс ... докт. техн. наук: спец. 05.20.01 / А.С. Кушнар'ов - Мелітополь, 1980. - 328 с.

4. Панов І.М. Механіко-технологічні основи розрахунку та проектування ґрунтообробних машин з ротаційними робочими органами: автореф. дисс ... докт. техн. наук: спец. 05.20.01 / І.М. Панов. – Челябінськ, 1984. - 36 с.

5. Рогач Ю.П. Обґрунтування оптимальних параметрів й розробка зональних робочих органів культиватора-плоскоріза для зони півдня України: автореф. дисс ... канд. техн. наук: спец. 05.20.01 / Ю. П. Рогач. - Мелітополь, 1992. - 15 с.

6. Блідих В.В. Удосконалення робочих органів ґрунтообробних машин на основі математичного моделювання технологічних процесів: автореф. дисс ... докт. техн. наук: спец. 05.20.01 / В.В. Блідих - Ленінград, 1989. - 39 с.

7. Терцагі К. Теорія механіки ґрунтів. Пер. з нім. М. : Госстройіздат, 1961. - 507 с.

8. Кушнар'ов А.С. Реологічна модель ґрунтів при впливі на них ґрунтообробних органів // Питання механізації сільського господарства. Т. 17. Мелітополь, 1971.

9. Іофіна А.П., Мударісов С.Г. Аналіз взаємодії дискового робочого органу з ґрунтом // Сб.науч.тр. «Удосконалення конструкцій і методів експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки». Уфа, 1995.-С.15-18.

10. Зозуля В.В., Мартиненко А.В., Лукін А.Н. Механіка матеріалів Видавництво НУВС. - Харків. - 2003. - 600 с.

#### BIBLIOGRAPHY

1. Rakhimov I. R. Improvement of the working bodies of machines for the main treatment of the soil on the basis of simulation of the interaction of wedge with soil: avtoref. Diss ... Cand. Tech. Sciences: spec. 05.20.01 / I.P. Rakhimov - Chelyabinsk, 2006. - 29 p.

2. Nerpin S.V., Chudnivsky A.F. Soil physics. - M.: Science, 1967.-583 p.

3. Kushnaryov A.S. Mechano-technological bases of the process of influence of working bodies of soil-working machines

and implements on the soil: diss ... dokt. Tech. Sciences: spec. 05.20.01 / A.S. Kushnaryov - Melitopol, 1980. - 328 p.

4. Panov I.M. Mechanical and technological bases of calculation and designing of soil tillage machines with rotational working organs: the author's abstract. Diss. .. Doct. Tech. Sciences: spec. 05.20.01 / I.M. Panov. - Chelyabinsk, 1984. - 36 p.

5. Rogach Yu.P. Justification of optimal parameters and development of zonal working bodies of a cultivator-plane cut for the southern zone of Ukraine: abstracts. Diss ... Cand. Tech. Sciences: spec. 05.20.01 / Y. P. Rogach. - Melitopol, 1992. - 15 p.

6. Blidikh V.V. Improvement of working bodies of soil-working machines on the basis of mathematical modeling of technological processes: the abstract of the author. Diss. Doct. Tech. Sciences: spec. 05.20.01 / V.V. Blidnih- Leningrad, 1989.-39p.

7. Tertsagi K. The theory of soil mechanics. Per. z nim M.: Gosstroyizdat, 1961. - 507 p.

8. Kushnaryov A.S. Rheological model of soils under the influence on them of soil cultivating organs // Pitannom mehanizatsii sil'skogo gosdarstva. T. 17. Melitopol, 1971.

9. Iofina A.P., Mudarisov S.G. An analysis of the interaction of the disk working body with the soil // Sb.nauch.tr. " Udoskonalennya konstruktsiy i metodiv ekspluatatsiyi ta remontu sil's'kohospodars'koyi tekhniky". Ufa, 1995.-P.15-18.

10. Zozulya V.V., Martinenko A.V., Lukin A.N. Materials mechanics Vydavnytstvo NUVS. - Kharkiv. - 2003. - 600 p.

## **RATIONALE FOR MODEL SOIL MEDIA INTERACTION IT FROM WORKING BODIES**

I.O. Siryi

### *Summary*

The article is based on an analysis of existing models of soil environment determined the most appropriate model, solving the interaction of the working body of the soil. Reasonable most rational theory of strength, which allows to investigate the interaction of soil protection and working body.

**Key words:** working body, soil environment, stress, deformation, Coulomb-Mohr theory.