УДК 631.431.2

Математична модель напруженого стану ґрунту під впливом клину

Пащенко В. Ф., д.т.н., професор, «Інститут овочівництва і баштанництва» НААН
Кім В. В., к.т.н., доцент, «Інститут овочівництва і баштанництва» НААН
Храмов М. С., аспірант, Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»

Анотація

Мета. Розробити математичну модель для визначення нормальних та дотичних напруг в ґрунті, що виникають у ньому під впливом клину.

Методи. Літературна інформація оброблялася по системному аналізу; теоретичні дослідження проводилися з використанням основних положень математики, класичної механіки та опору матеріалів; стендові випробування проводилися з використанням загальноприйнятих методів; обробка результатів експерименту здійснювалася з використанням спеціальних прикладних комп'ютерних програм.

Результати. Розроблено математичну модель для визначення напружень у ґрунті, що виникають в ньому в результаті руху клину. Встановлено, що руйнування пласта ґрунту при згині відбувається на ділянках, на яких значення нормальних або дотичних напруг досягають гранично допустимого значення. Експериментально вивчено вплив параметрів роботи клину, зокрема, кута кришіння і глибини ходу в ґрунті, на кут сколювання пласта, величини пройденого шляху до початку процесу сколювання та його характеру.

Висновки. Отримана математична модель, що описує фізичну сутність процесу кришіння пласта ґрунту клином, може бути використаний для знаходження раціональних кутів кришіння робочих органів в залежності від властивостей ґрунту та глибини його обробітку. Встановлено, що збільшення глибини обробітку ґрунтів сприяє збільшенню кута сколювання. Причому інтенсивність росту кута сколювання зменшується зі збільшенням глибини ходу клину. На малих глибинах обробітку ґрунту до 0,05 м переважним видом деформації є зсув, а зі збільшенням глибини ходу клину – відрив.

Ключові слова: математична модель, ґрунт, клин, згин, зсув, відрив, напруження, пласт, кришіння, деформація.

UDC 631.431.2

The mathematical model of the stressed state of the soil under the influence of a wedge

Pascenco V. F., Doctor of Engineering, Professor, "Institute of Vegetables and Melons" NAAS
Kim V. V., Ph.D., Associate Professor, "Institute of Vegetables and Melons" NAAS
Khramov N. S., Graduate student, National Scientific Center «IAAE»

Annotation

Purpose. Develop a mathematical model for determining the normal and tangential stresses in the soil that arise in it under the influence of a wedge.

Methods. Literary information was processed by system analysis; theoretical studies were carried out using the basic provisions of mathematics, classical mechanics and the resistance of materials; bench tests were conducted using conventional techniques; the processing of experimental results was carried out using special applied computer programs.

Results. A mathematical model has been developed to determine the stresses in the soil that arise in it as a consequence of the motion of the wedge. It is established that the fracture of the soil layer during bending occurs in areas where the value of normal or tangential stresses reaches the maximum permissible value. The influence of the wedge working parameters, in particular, the crumb angle and

depth of travel in the soil, on the angle of the formation shear, the distance traveled before the chipping process and its character, has been experimentally studied.

Conclusions. The obtained mathematical model describing the physical essence of the process of crumbling of the soil layer by a wedge can be used to find the rational angles of crumbling of working organs depending on the properties of the soil and the depth of its processing. It is established that an increase in the depth of tillage promotes an increase in the angle of cleavage. And the intensity of the growth of the chipping angle decreases with increasing depth of the wedge. At shallow depths of tillage to 0.05 m, the predominant form of deformation is a shear, and with an increase in the depth of the wedge, a separation occurs.

Keywords: mathematical model, soil, wedge, bending, shear, separation, stress, formation, crumbling, deformation.

УДК 631.431.2

Математическая модель напряженного состояния почвы под воздействием клина

Пащенко В. Ф., д.т.н., профессор, «Институт овощеводства и бахчеводства» НААН
Ким В. В., к.т.н., доцент, «Институт овощеводства и бахчеводства» НААН
Храмов Н. С., аспирант, Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»

Аннотация

Цель. Разработать математическую модель для определения нормальных и касательных напряжений в почве, которые возникают в ней под воздействием клина.

Методы. Литературная информация обрабатывалась по системному анализу; теоретические исследования проведены с использованием основных положений математики, классической механики и сопротивления материалов; стендовые испытания проводились с использованием общепринятых методик; обработка результатов эксперимента осуществлялась с использованием специальных прикладных компьютерных программ.

Результаты. Разработана математическая модель для определения напряжений в почве, которые возникают в ней вследствие движения клина. Установлено, что разрушения пласта почвы при изгибе происходит на участках, на которых значение нормальных или касательных напряжений достигает предельно-допустимого значения. Экспериментально изучено влияние параметров работы клина, в частности угла крошения и глубины хода в почве, на угол скалывания пласта, величину пройденного пути до начала процесса скалывания и его характера.

Выводы. Полученная математическая модель, описывающая физическую сущность процесса крошения пласта почвы клином, может быть использована для нахождения рациональных углов крошения рабочих органов в зависимости от свойств почвы и глубины её обработки. Установлено, что увеличение глубины обработки почвы способствует возрастанию угла скалывания. Причем интенсивность роста угла скалывания снижается с увеличением глубины хода клина. На малых глубинах обработки почвы до 0,05 м преобладающим видом деформации является сдвиг, а с увеличением глубины хода клина – отрыв.

Ключевые слова: математическая модель, почва, клин, изгиб, сдвиг, отрыв, напряжения, пласт, крошение, деформация.

Постановка завдання. У загальному випадку при обробітку ґрунтів робочі органи сільськогосподарських машин та знарядь, впливаючи на ґрунт, сприяють зміні його стану.

Для спрощення вивчення фізичної сутності процесу впливу робочого органу на ґрунт В. П. Горячкін [1] запропонував розглянути останній як простий клин або сукупності безлічі простих клинів. З появою тракторів у першій половині минулого сторіччя в моделюванні процесу обробітку ґрунту клином [2] та зміною ґрунтообробної техніки широко використовується поняття питомого опору різанню робочими органами типу лемеша. З інженерної позиції ґрунт, як і будь-яке інше фізичне тіло, характеризується

рядом механічних та фізичних параметрів та властивостей, пов'язаних з його виникненням, фізичним, механічним та мінералогічним складом. Однією з властивостей ґрунту є здатність протистояти і руйнуватися під впливом зовнішніх сил. Знання цих властивостей дозволяє більш раціонально вибрати для кожного ґрунту та його конкретного стану відповідний тип ґрунтообробної машини, її параметри та режими роботи [3].

Тому перед авторами даної статті було поставлено завдання отримати продовження теорії процесу взаємодії клину з ґрунтом в напрямку визначення напруженості в ґрунті та раціональних його параметрів в залежності від умов роботи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вивченню процесів, які виникають у ґрунті під впливом клину, присвячені роботи В. П. Горячкіна, П. М. Василенка, Т. М. Галагурського, В. О. Желіговского, А. М. Зеленіна, А. С. Кушнарьова, Я. С. Гукова, В. О. Дубровина, В. Ф. Пащенка, І. А. Шевченка, В. П. Ковбаси, М. В. Сало та ін. [1–11].

В. В. Бородкіна і В. Г. Кірнахін визначили, що більшість використовуваних в сільському господарстві суглинкових і глинистих ґрунтів під впливом клина руйнується шляхом відриву. Фізична сутність процесів, що виникає під впливом клину в відокремленому пласті ґрунту, недостатньо вивчена [12–17]. Однак, як вважав В. П. Горячкін, це пов'язано з тим, що процес взаємодії ґрунту з клином пов'язаний з деформацією пласта і є «основним запобіганням всякого роду теоретичних досліджень».

На сьогоднішній день сутність фізичних процесів, що відбуваються в ґрунті під дією робочих органів, вивчена недостатньо, а це приводить до того, що параметри робочих органів машин, що визначають процес кришіння пласту, забезпечуються без урахування конкретних агрофізичних властивостей ґрунтів, вихідного його стану та агротехнологічних термінів його обробітку. Тому перед нами ставиться задача скласти математичну модель для визначення в ґрунті напруг під впливом клину та отримати залежності, за допомогою яких можливо визначити кути кришіння для різних глибин обробітку та показників міцності ґрунтів за заданими параметрами якості його проведення.

Виклад основних результатів досліджень. Вивченню процесів, що відбуваються в ґрунті під впливом клина, присвячені роботи В. П. Горячкіна, Т. М. Галагурского, В. О. Желіговського, А. Н. Зеленіна, А. С. Кушнарьова та ін. При цьому використовувалися гіпотези всебічного стиску, теорії суцільних середовищ, пластичної текучості і т. ін.

При вирішенні задач на міцність використовується ряд експериментально обґрунтованих гіпотез, а саме:

- теорія найбільших нормальних напружень (Галілей, Ренкін);
- теорія найбільших деформацій (Сен-Венан);
- теорія найбільших дотичних напружень (Кулон, Гест, Треска);
- енергетична теорія міцності (Губер, Мізес);
- теорія Мора (максимум $\tau \pm fG$).

При використанні тієї чи іншої теорії міцності необхідно визначити значення граничних напружень, що викликають в матеріалі деформації, які призводять до руйнування вихідної структури. Граничні напруження легко визначаються експериментально для деформацій розтягання і стискання.

На підставі аналізу результатів численних експериментальних досліджень встановлено, що для зв'язних ґрунтів має місце відділення клином пласта ґрунту від основної маси шляхом його відриву. Для опису фізичної сутності явища скористаємося гіпотезою про відокремлення клином пласта ґрунту, що підрізається, шляхом його згину. При цьому ґрунт будемо розглядати як однорідне середовище з рівноміцнісними властивостями в усьому його об'ємі, що піддається впливу клину, але з різними механічними характеристиками при стисканні та розтяганні.

Внутрішній момент у розрізі пласта ґрунту визначаємо за рівнянням [18]:

$$M_{\chi} = \int \theta_p \cdot Y \cdot dF_p + \int \theta_{cm} \cdot Y \cdot dF_{cm}\,, \tag{1}$$

де θ_p – напруження при розтяганні;

θ_{cm} – напруження при стисканні;

Y – координата від «нейтрального» шару до поперечного перерізу;

F – площа поперечного перерізу з врахуванням того, що:

$$\theta_p = \frac{Y}{\rho} E_p\,, \qquad \theta_{cm} = \frac{Y}{\rho} E_{cm}\,,$$

де E_p , E_{cm} – модуль Юнга відповідно для розтягання та стискання механічної системи;

ρ – радіус кривизни нейтрального шару.

На підставі рівності моменту зовнішніх сил і моменту напружень запишемо:

$$\int \frac{Y^2}{\rho} E_p dF_p + \int \frac{Y^2}{\rho} E_{cm} dF_{cm} = -\int_{\theta}^{\varsigma} \left[\gamma(\varsigma)(\chi - \varsigma) + \alpha(\varsigma)\omega(\varsigma)(\chi - \varsigma)\right] d\varsigma\,. \tag{2}$$

У відповідності до гіпотези плоских перетинів, до якої приймається, що перетин перпендикулярних до нейтрального шару до деформації залишається перпендикулярними до нього і після деформації, модулі Юнга залишаються постійними на висоті шару, отже, відношення модулів Юнга до радіусу кривизни нейтрального шару не залежить від змінної інтегрування, а також з урахуванням того, що [18]:

$$M_{\chi} = \int_F Y^2 dF = I\,,$$

де I – осьовий момент інерції площі поперечного перетину.

При малих деформаціях згину маємо:

$$\frac{1}{\rho} \approx \frac{d^2\omega}{d\chi^2}.$$

Тоді рівняння (2) запишемо:

$$\frac{d^2\omega}{d\chi^2}\left(E_p I_p + E_{cm} I_{cm}\right) = -\int_0^{\chi} \left[\gamma(\varsigma)(\chi - \varsigma) + \alpha(\varsigma)\omega(\chi - \varsigma)\right] d\varsigma\,, \tag{3}$$

де I_p и I_{cm} – моменти інерцій площ областей відповідно розтягання та стискання поперечного перерізу відносно нейтрального шару.

Для визначення положення нейтрального шару скористаємося наступними формулами [17, 18]:

$$h_1 = \frac{h\sqrt{E_{cm}}}{\sqrt{E_p} + \sqrt{E_{cm}}}\,, \tag{4}$$

$$h_2 = \frac{h\sqrt{E_p}}{\sqrt{E_p} + \sqrt{E_{cm}}}, \tag{5}$$

де $h = h_1 + h_2$ – глибина ходу клина.

Тоді для механічної системи з поперечним перерізом у формі прямокутника:

$$I_p = \frac{bh_1^3}{3}, \tag{6}$$

$$I_{cm} = \frac{bh_2^3}{3}, \tag{7}$$

де b – ширина механічної системи.

Інтегрально-диференційне рівняння (3) продиференціюємо двічі за χ:

$$\frac{d^3\omega}{d\chi^3}\left(E_p I_p + E_{cm} I_{cm}\right) = -\left[\int_0^{\chi} \gamma(\varsigma)\chi d\varsigma - \int_0^{\chi} \gamma(\varsigma)\varsigma d\varsigma + \int_0^{\chi} \alpha(\varsigma)\omega(\varsigma)\chi d\varsigma - \int_0^{\chi} \alpha(\varsigma)\omega(\varsigma)\varsigma d\varsigma\right]^1 =$$

$$\gamma(\varsigma) + \alpha(\varsigma)\omega(\varsigma)d\varsigma + \chi[(\gamma(\chi) + \alpha(\varsigma)\omega(\chi))] - \gamma(\chi)\chi - \alpha(\varsigma)\omega(\chi)\chi) =$$

$$= -\int_0^{\chi} (\gamma(\varsigma) + \alpha(\varsigma)\omega(\varsigma))d\varsigma;$$

$$\frac{d^4\omega}{d\chi^4}\left(E_p I_p + E_{cm} I_{cm}\right) = -[\gamma(\chi) + \alpha(\chi)\omega(\chi)].$$

Отримане рівняння наведемо до виду:

$$\frac{d^4\omega}{d\chi^4} + \frac{\alpha}{E_p I_p + E_{cm} I_{cm}}\omega + \frac{\gamma}{E_p I_p + E_{cm} I_{cm}} = 0$$

або

$$\frac{d^4\omega}{d\chi^4} + K_1\omega + K_2 = 0, \tag{8}$$

де

$$K_1 = -\frac{\alpha}{E_p I_p + E_{cm} I_{cm}}, \tag{9}$$

$$K_2 = \frac{\gamma}{E_p I_p + E_{cm} I_{cm}}. \tag{10}$$

Характеристичне рівняння лінійного однорідного диференціального рівняння має вигляд:

$$r^4 + K_1 r + K_2 = 0. \tag{11}$$

Перетворимо рівняння (11) у рівняння третього ступеню. Для цього введемо позначення:

$$r = Y - \frac{K_2}{K_1}.$$

При цьому $r' = y'; \quad r'' = y''; \quad r''' = y'''; \quad r^{IV} = y^{IV}.$

Отриманий вираз підставимо в (11):

$$y^4 + K_1 y = 0;$$

$$y = 0;$$

$$y^3 + K_1 = 0.$$

Використовуючи формули Кардано отримаємо:

$$y_1 = -\sqrt[3]{K_1};$$

$$y_2 = \frac{1}{2}\sqrt[3]{K_1} + \frac{1}{2}\sqrt[3]{K_1}\, i;$$

$$y_3 = \frac{1}{2}\sqrt[3]{K_1} - \frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}\, i.$$

Тоді

$$y = C_1 + C_2 l^{-\sqrt[3]{K_1}x} + l^{0,5\sqrt[3]{K_1}x}\left(C_3 \cos\frac{1}{2}\sqrt[3]{K_1}x + C_4 \sin\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x\right).$$

Загальний розв’язок диференціального рівняння (11) запишеться:

$$\omega = C_1 + C_2 l^{-\sqrt[3]{K_1}x} + l^{0,5\sqrt[3]{K_1}x}\left(C_3 \cos\frac{1}{2}\sqrt[3]{K_1}x + C_4 \sin\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x\right) - \frac{K_2}{K_1}, \qquad (12)$$

де $C_1; C_2; C_3; C_4$ – постійні інтегрування.

Значення постійних інтегрування знаходимо з граничних умов.

Припустимо, що при $\chi = 0$:

$$\omega = \upsilon \cdot \Delta t \; tg\alpha; \qquad (13)$$

$$\omega' = 0, \qquad (14)$$

де υ – поступальна швидкість руху клина;

Δt – крок переміщення клина за часом;

α – кут кришіння пласта ґрунту.

Умова (13) відповідає припущенню, що переміщення перерізу шару при $\chi = 0$ співпадає з переміщенням крайньої кромки клина. Умова (14) означає, що в перетині $\chi = 0$ відсутня деформація згину.

Кут кришіння ґрунту клином змінюється від 6° до 36°.

Приймаючи, що довжина відокремлюємого шару ґрунту не більше 0,5, можемо записати умови, кінематично визнаючи нерухомість відповідного перерізу:

при $\chi = 0{,}5$

$$\omega = 0; \tag{15}$$

$$\omega' = 0. \tag{16}$$

Перша похідна функції (12) запишеться:

$$\omega' = -C_2\sqrt[3]{K_1}\,l^{-\sqrt[3]{K_1}x} + \frac{1}{2}\sqrt[3]{K_1}\,l^{0,5\sqrt[3]{K_1}x}\left(C_3\cos\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x + C_4\sin\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x\right) +$$
$$+\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}\,l^{0,5\sqrt[3]{K_1}x}\left(-C_3\sin\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x + C_4\cos\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x\right). \tag{17}$$

Друга похідна має вид:

$$\omega'' = C_2\sqrt[3]{K_1^2}\,l^{-\sqrt[3]{K_1}x} + \frac{1}{4}\sqrt[3]{K_1^2}\,l^{0,5\sqrt[3]{K_1}x}\left(C_3\cos\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x + C_4\sin\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x\right) +$$
$$+\frac{1}{4}\sqrt[3]{3K_1^2}\,l^{0,5\sqrt[3]{K_1}x}\left(-C_3\sin\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x + C_4\cos\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x\right) + \frac{1}{4}\sqrt[3]{3K_1^2}\,l^{0,5\sqrt[3]{K_1}x}\times$$
$$\times\left(-C_3\sin\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x + C_4\cos\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x\right) - \frac{1}{4}\sqrt[3]{(3K_1)^2}\,l^{0,5\sqrt[3]{K_1}x}\times$$
$$\times\left(C_3\cos\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x + C_4\sin\frac{1}{2}\sqrt[3]{3K_1}x\right). \tag{18}$$

Третя похідна має вид:

$$\omega''' = -K_1.$$

Вирішуючи систему рівнянь (13–16) і враховуючи вирази (17) та (18), знаходимо значення постійних інтегрування. Значення останніх підставляємо у вираз (12) і отримаємо рівняння кривої, яка описує профіль згину нейтрального шару ґрунту під дією клину за прийнятою гіпотезою «чистого згину» відокремлюваного шару.

Напруження у крайніх волокнах механічної системи при згині на розтягування та стискання визначають за формулою [18]:

$$\sigma_p = \omega'' E_p h_1; \tag{19}$$

$$\sigma_{cm} = \omega'' E_{cm} h_2. \tag{20}$$

Руйнування у ґрунті відбуваються у випадку, якщо значення напружень у крайніх волокнах досягають гранично-допустимих величин:

$$\sigma_p \geq [\sigma_p]; \tag{21}$$

$$\sigma_{cm} \geq [\sigma_{cm}], \tag{22}$$

де $[\sigma_p]$; $[\sigma_{cm}]$ – допустимі напруження у ґрунті відповідно на розтягання і стискання.

Дотичні напруження в ґрунті при його згинанні визначаються за формулою [18]:

$$\tau = \frac{\sigma Q}{bh^2}\left(\frac{h^2}{4} - Y\right),$$

де Q – поперечна сила;

Y – координата шару у перерізі механічної системи відносно нейтрального шару.

Найбільше дотичне напруження має місце при $Y = 0$:

$$\tau_{\max} = \frac{3Q}{2bh}.$$

Враховуючи, що [18]:

$$Q = E \cdot I_\chi \omega''',$$

максимальне значення дотичного напруження в механічній системі визначається:

$$\tau_{\max} = \frac{3E \cdot I_\chi \omega'''}{2bh}. \tag{23}$$

Процес руйнування шару ґрунту при згинанні відбувається на ділянках, на яких значення нормальних або дотичних напружень досягає гранично-допустимого значення.

Для підтвердження теоретичних досліджень був проведений експеримент з вивчення процесу взаємодії клину з ґрунтом який проводився при вологості ґрунту 24% в дворазової повторності.

Схема установки для сколювання ґрунту шляхом зсуву приведена на рисунку 1. При зсуві пласта ґрунту характер зміни форми крейдового прошарку у напрямку поверхні сколювання однаковий по всіх шарах, розташованих по глибині обробітку.

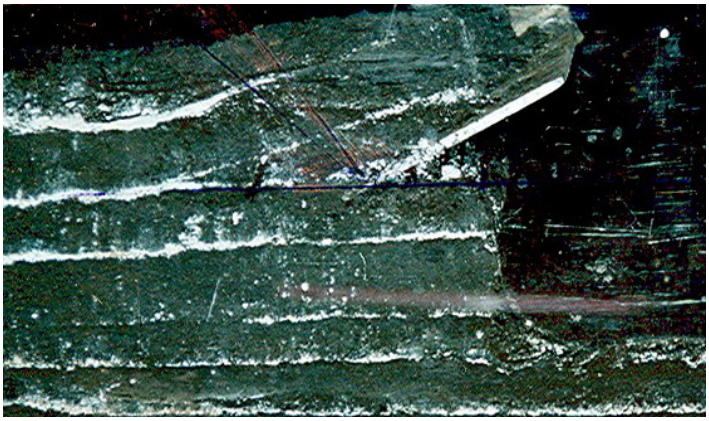

Рис. 1. Схема установки сколювання пласта ґрунту шляхом зсуву

Fig. 1. Scheme of installation of shearing of the soil layer by shear

Вивчався вплив параметрів роботи клину, зокрема кута кришіння та глибини ходу клина у ґрунті, на кут сколювання пласта, величину пройденого шляху від початку процесу сколювання та його характеру. Результати проведених досліджень наведено у таблиці.

Таблиця. Результати експерименту по вивченню процесу взаємодії клина з ґрунтом

Table. Results of the experiment on the study of the interaction of wedge with soil

№ з/р	Глибина ходу клина, м	Кут кришіння, град.	Пройдений шлях до початку процесу сколювання, м·10^{-3}			Кут сколювання, град.			Вид процесу сколювання
			Повторності			Повторності			
			1	2	серед.	1	2	серед.	
1	0,04	15	30	32	31,0	40	41	40,5	зсув
2	0,06	15	40	41	40,5	42	43	42,5	відрив
3	0,08	15	55	53	54,0	49	48	48,5	відрив
4	0,10	15	62	59	60,5	52	51	51,5	відрив
5	0,04	25	26	24	25,0	37	38	37,5	зсув
6	0,06	25	33	31	32,0	43	42	42,5	відрив
7	0,08	25	43	44	43,5	48	45	46,5	відрив
8	0,10	25	51	49	50,0	52	48	50,0	відрив
9	0,04	35	22	23	22,5	35	36	35,5	зсув
10	0,06	35	28	26	27,0	43	39	41,0	зсув
11	0,08	35	35	37	36,0	48	46	47,0	відрив
12	0,10	35	42	44	43,0	51	52	51,5	відрив

Статистична обробка експериментальних даних показує, що доля впливу глибини ходу клина на величину пройденого шляху до початку процесу сколювання шару ґрунту становить 72,67%, кута кришіння – 17,45% та їх парної взаємодії – 2,38%. Найменша суттєва різниця за такими факторами, як глибина ходу клина та кут кришіння відповідно дорівнює 5,88 і 5,09. Частка впливу глибини ходу клина, кута кришіння та їх парної взаємодії на кут сколювання шару ґрунту відповідно дорівнює 90,69%, 2,71% і 2,63%. Найменша суттєва різниця за факторами відповідно дорівнює 1,87 і 1,62.

Достовірність даних таблиці склала 95%.

Аналіз результатів таблиці вказує на те, що кут сколювання практично не залежить від кута кришіння пласту ґрунту клином. Величину кута сколювання в основному визначали глибиною обробітку ґрунту (рис. 2). Зміна глибини ходу клину від 0,04 до 0,10 м сприяє збільшенню кута сколювання від 35 до 50°. Причому інтенсивність росту кута сколювання зі збільшенням глибини ходу клину знижується.

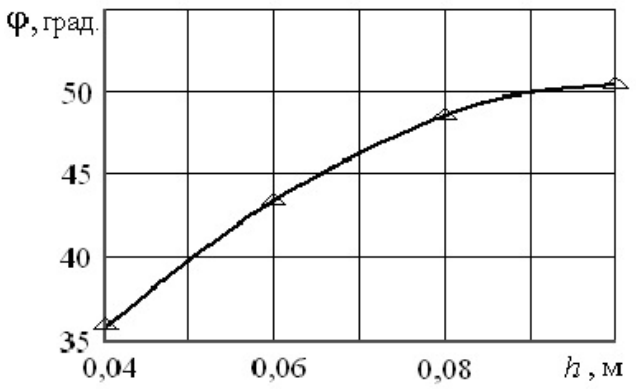

Рис. 2 Залежність кута сколювання пласта ґрунту від глибини ходу клину
Fig. 2 Dependence of the soil cleavage angle from the depth of the wedge stroke

На рисунку 3 представлена залежність пройденого шляху клином у ґрунті до початку процесу сколювання пласта.

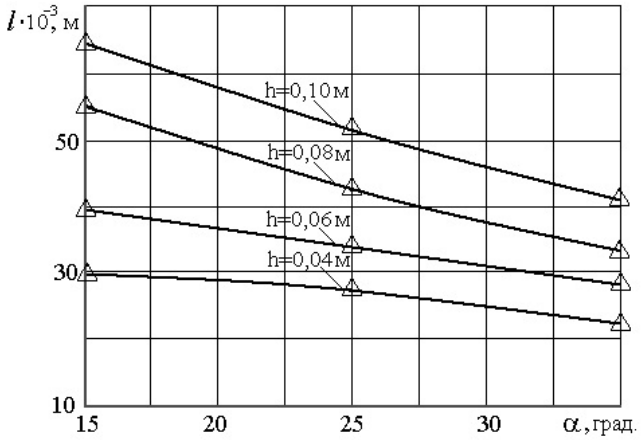

Рис. 3 Залежність пройденого шляху клином в ґрунті від початку процесу сколювання пласта
Fig. 3. Dependence of the traversed path by a wedge in the soil before process of cleavage of its layer

Аналіз даних графіка підтверджує результати теоретичних досліджень про збільшення довжини сколотого пласта зі зростанням глибини обробітку ґрунту і зниженням кута кришіння клина.

Аналіз виду деформацій сколювання пласта ґрунту (табл.), який знаходиться у фазі фізичної стиглості, визначається глибиною ходу клина і практично не залежить від кута кришіння. На малих глибинах обробітку ґрунту (до 0,04 м) основним видом деформації є зсув ґрунту, що підтверджують результати теоретичних досліджень.

Висновки

Отримана математична модель, яка описує фізичну сутність процесу кришіння пласта ґрунту клином, може бути використана для знаходження раціональних кутів кришіння робочих органів залежно від властивостей ґрунту і глибини його обробки. Величина кута сколювання ґрунту практично не залежить від кута кришіння пласта ґрунту і в основному визначається глибиною ходу клину. Збільшення глибини обробітку ґрунту сприяє зростанню кута сколювання. Причому інтенсивність росту кута сколювання знижується зі збільшенням глибини ходу клину.

На малих глибинах обробітку ґрунту до 0,05 м переважним видом деформації є зсув, а зі збільшенням глибини ходу клина – відрив.

Библіографія

1. Горячкин В. П. Собрание сочинений. Т.2. 2-е изд. М.: Колос, 1968. 455 с.
2. ОСТ-70.2.15-73. Испытание сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. М.: Сельхозтехника, 1974.
3. Панов И. М., Ветохин В. И. Физические основы механики почв. К.: Феникс, 2008. 266 с.
4. Василенко П. М., Бабий П. Т. Культиваторы: (конструкция, теория и расчет). К.: Изд-во Укр. акад. с.-х. наук, 1961. 240 с.
5. Гуков Я. С. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України: автореф. дис. … докт. техн. наук. / Глеваха, 1998. 33 с.
6. Дубровин В. А., Левчук Н. С. Перспективы дифференциации основной обработки почвы. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2001. № 2. С. 32–34.
7. Зеленин А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М.: Машиностроение, 1968. 375 с.
8. Корабельский В. И. Графоаналитический метод конструирования рабочих поверхностей почвообрабатывающих машин по наперед заданным основным агротехническим и технологическим требованиям: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Киев, 1972. 22 с.
9. Кушнарев А. С. Механико-технологические основы процесса взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву: автореф. дис. … докт. техн. наук. / Челябинск, 1981. 502 с.
10. Пащенко В. Ф. Механико-технологические средства эколого-экономического усовершенствования процессов обработки почвы: дис … докт. техн. наук: 05.05.11. / Х., 2005. 335 с.
11. Сало В, Сисолін П. Не плуг і не плоскоріз. *Сільськогосподарська техніка України*. 1997. Вип. № 1. С. 14–15.
12. Ветохин В. И. Обоснование формы и параметров рыхлительных рабочих органов с целью снижения энергозатрат на обработку почвы: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ВИСХОМ. М., 1992. 24 с.
13. Войтюк Д. Г., Пилипака С. Ф. Побудова траєкторії руху частинок ґрунту по циліндричних поверхнях і знаходження кривої перерізу циліндра. *Техніка АПК*. 1999. № 8. С. 6–9.
14. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1971. 248 с.
15. Кушнарев А. С. Механика почв: задачи и состояние работ. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1987. № 3. С. 9–13.
16. Кушнарев А. С., Кочев В. И. Механико-технологические основы обработки почвы. К.: Урожай, 1989. 140 с.
17. Пащенко В. Ф. Моделирование взаимодействия с почвой рабочих органов сельскохозяйственных машин и орудий: монография. / Х., 1994. 133 с.
18. Федосеев В. И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1967. 552 с.

Bibliohrafiia

1. Gorjachkin V. P. Sobranie sochinenij. T. 2. 2-e izd. M.: Kolos, 1968. 455 s.
2. OST-70.2.15-73. Ispytanie sel'skohozjajstvennoj tehniki. Metody opredelenija uslovij ispytanij. M.: Sel'hoztehnika, 1974.
3. Panov I. M., Vetohin V. I. Fizicheskie osnovy mehaniki pochvy. K.: Feniks, 2008. 266 s.
4. Vasilenko P. M., Babij P. T. Kul'tivatory: (konstrukcija, teorija i raschet). Kiev: Izd-vo Ukr. akad. s.-h. nauk, 1961. 240 s.
5. Gukov Ja. S. Mehaniko-tehnologichne obrruntuvannja energozberigajuchih zasobiv dlja mehanizacії obrobitku rruntu v umovah Ukraïni: avtorif. dis. … dokt. tehn. nauk / Glevaha, 1998. 33 s.
6. Dubrovin V. A., Levchuk N. S. Perspektivy differenciacii osnovnoj obrabotki pochvy. *Traktory i sel'skohozjajstvennye mashiny*. 2001. № 2. S. 32–34.
7. Zelenin A. N. Osnovy razrushenija gruntov mehanicheskimi sposobami. M.: Mashinostroenie, 1968. 375 s.
8. Korabel'skij V. I. Grafoanaliticheskij metod konstruirovanija rabochih poverhnostej pochvoobrabatyvajushhih mashin po napered zadannym osnovnym agrotehnicheskim i tehnologicheskim trebovanijam: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk / Kiev, 1972. 22 s.
9. Kushnarev A. S. Mehaniko-tehnologicheskie osnovy processa vzaimodejstvija rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin i orudij na pochvu: avtoref. dis. … dokt. tehn. nauk / Cheljabinsk, 1981. 502 s.
10. Pashhenko V. F. Mehaniko-tehnologicheskie sredstva jekologo-jekonomicheskogo usovershenstvovanija processov obrabotki

pochvy: dis … dokt. tehn. nauk: 05.05.11. / H., 2005. 335 s.

11. Salo V., Sisolin P. Ne plug i ne ploskoriz. *Sil's'kogospodars'ka tehnika Ukraïni*. 1997. Vip. № 1. S. 14–15.

12. Vetohin V. I. Obosnovanie formy i parametrov ryhlitel'nyh rabochih organov s cel'ju snizhenija jenergozatrat na obrabotku pochvy: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk / VISKHOM. M., 1992. 24 s.

13. Vojtjuk D. G., Pilipaka S. F. Pobudova traektoriï ruhu chastinok gruntu po cilindrichnih poverhnjah i znahodzhennja krivoï pererizu cilindra. *Tehnika APK*. 1999. № 8. S. 6–9.

14. Il'jushin A. A. Mehanika sploshnoj sredy. M.: Izd-vo MGU, 1971. 248 s.

15. Kushnarev A. S. Mehanika pochv: zadachi i sostojanie rabot. *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 1987. № 3. S. 9–13.

16. Kushnarev A. S., Kochev V. I. Mehaniko-tehnologicheskie osnovy obrabotki pochvy. K.: Urozhaj, 1989. 140 s.

17. Pashhenko V. F. Modelirovanie vzaimodejstvija s pochvoj rabochih organov sel'skohozjajstvennyh mashin i orudij: monografija. / H., 1994. 133 s.

18. Fedoseev V. I. Soprotivlenie materialov. M.: Nauka, 1967. 552 s.

Bibliography

1. Goryachkin V. P. Collected works. T.2. 2nd prod. M.: Ear, 1968. 455 p.

2. IST-70.2.15-73. Test of agricultural machinery. Methods of definition of test conditions. M.: Agricultural machinery, 1974.

3. Panov I. M., Vetokhin V. I. Physical fundamentals of mechanics of soils. K.: Phoenix, 2008. 266 p.

4. Vasilenko P. M., Babiy P. T. Cultivators: (a design, the theory and calculation). Kiev: Publishing house of the Ukrainian academy of agricultural sciences, 1961. 240 p.

5. Gukov Y. S. Mechanic-technological substantiation of energy saving means for mechanization of soil cultivation in the conditions of Ukraine: avtoref. diss. on the recient of sciences degree of dr. of tehn. sciences: special. 05.05.11 “Machines and facilities of agricultural production mechanization” / Glevakha, 1998. 33 p.

6. Dubrovin V. A., Levchuk N. S. Prospects of differentiation of the main processing of the soil. *Tractors and farm vehicles*. 2001. № 2. P. 32–34.

7. Zelenin A. N. Bases of destruction of soil in the mechanical ways. M.: Mechanical engineering, 1968. 375 p.

8. Korabelsky V. I. A graphic-analytical method of designing of working surfaces of tillage machines on beforehand to the set main agrotechnical and production requirements: : avtoref. diss. on the recient of sciences degree of cand. technic. sciences: special. (05.150) / Kiev, 1972. 22 p.

9. Kushnarev A. S. Mechanic-technological bases of process of interaction of working bodies of tillage machines and tools on the soil: avtoref. diss. on the recient of sciences degree of dr. of tehn. sciences: 05.20.01 “Technologies and means of agricultural mechanization” / Chelyabinsk, 1981. 502 p.

10. Pashchenko V. F. Mechanic-technological means of ekologo-economic improvement of processing of the soil: Dis. ... Dr. tehn. sciences: / Kh., 2005. 335 p.

11. Salo V., Sysolin P. Not plow and not flattened. *Agricultural machinery of Ukraine.* 1997. Issue №. 1. P. 14–15.

12. Vetokhin V. I. Justification of a form and parameters the loosening of working bodies for the purpose of decrease in energy consumption on processing of the soil: avtoref. diss. on the recient of sciences degree of cand. technic. sciences: special. 05.20.01 “Technologies and means of agricultural mechanization” / VISCHOM. M., 1992. 24 p.

13. Voytyuk D. G., Pilipaka S. F. Construction of a trajectory of motion of soil particles on cylindrical surfaces and finding a cylinder cross section curve. *Engineering of agrarian and industrial complex*. 1999. № 8. P. 6–9.

14. Ilyushin A. A. Mechanics of the continuous environment. M.: MSU publishing house, 1971. 248 p.

15.Kushnarev A. S. Mechanics of soils: tasks and condition of works. *Mechanization and electrification of agriculture*. 1987. № 3. P. 9–13.

16. Kushnarev A. S., Kochev V. I. Mechanic-technological bases of processing of the soil. K.: Vintage, 1989. 140 p.

17. Pashchenko V. F. Modeling of interaction with the soil of working bodies of farm vehicles and tools: the monograph. Kh., 1994. 133 p.

18. Fedoseyev V. I. Resistance of materials. M.: Science, 1967. 552 p.