

Описано математичну модель для визначення напружень, які виникають в ґрунті під впливом клина. Отримано залежності, за допомогою яких для різної глибини обробітки і показників міцності ґрунту в залежності від заданих параметрів якості проведення операцій можна визначити необхідний кут кришення. Отримані залежності дозволили визначити параметри динамічних систем, які сприяють зниженню їх енергоємності, підвищенню якісних показників роботи і створенню умов для підвищення продуктивності агрегатів

Ключові слова: клин, ґрунт, метод варіаційного обчислення, пласт ґрунту, зрив, сколювання, зрушення, кришення, долото, чизельний робочий орган

Описана математическая модель для определения напряжений, которые возникают в почве под воздействием клина. Получены зависимости, с помощью которых для разной глубины обработки и прочностных показателей почвы в зависимости от заданных параметров качества проведения операции можно определить необходимый угол крошения. Полученные зависимости позволили определить параметры динамических систем, которые способствуют снижению их энергоёмности, повышению качественных показателей работы и созданию условий для повышения производительности агрегатов

Ключевые слова: клин, почва, метод вариационного исчисления, пласт почвы, срыв, скалывание, сдвиг, крошение, долото, чизельный рабочий орган

УДК 631.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.79912

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИНА

С. И. Корниенко

Доктор сельскохозяйственных наук*

В. Ф. Пащенко

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: v.e.pashenko@ukr.net

В. И. Мельник

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: victor_melnik@ukr.net

С. А. Харченко

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: kharchenko_mtf@ukr.net

Н. С. Храмов

Аспирант

Институт овощеводства и бахчеводства НААН
ул. Институтская, 1, с. Селекционное, Украина, 62478

E-mail: karma.88@mail.ru

*Кафедра оптимизации

технологических систем им. Т. П. Евсюкова
Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства им. Петра Василенко
ул. Артема, 44, г. Харьков, Украина, 62001

1. Введение

При механизированной обработке рабочие органы сельскохозяйственных машин и орудий воздействуют на почву, чем способствуют изменению её структурного состояния [1, 2]. Для упрощения изучения физической сущности процесса воздействия рабочего органа на почву в [3] предложено рассматривать рабочий орган как простой клин или совокупность множества простых клиньев. История развития учения о работе клина рассматривалась в контексте с общей теорией резания материалов.

В [3] процесс образования отделяемого клином пласта почвы разделен на две фазы: первая – смятие и уплотнение подрезаемого пласта почвы, вторая – сдвиг этого пласта. Анализом результатов исследований установлено, что отделение пласта почвы от монолита происходит путем сдвига или отрыва в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемой почвы.

Описанная модель физической сущности процесса взаимодействия клина с почвой повсеместно используется на практике для решения множества задач по обоснованию параметров почвообрабатывающих рабочих органов. Однако физическая сущность про-

цессов, которые происходят под действием клина в отделяемом пласте почвы, изучена недостаточно. По итогам исследований [3] это обусловлено спецификой процесса взаимодействия почвы с клином, который сопровождается деформацией пласта. Последнее обстоятельство является «основным препятствием для всякого рода теоретических исследований» [3].

Исследование методики построения математической модели, которая опишет физические процессы крошения пласта почвы клином, может быть использована для нахождения рациональных углов крошения рабочих органов в зависимости от механических свойств почвы и глубины ее обработки, позволит повысить качество работы сельскохозяйственных агрегатов, что является актуальной и перспективной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

На основании анализа [4–9] результатов многочисленных экспериментов установлено, что для связанных почв имеет место отделение клином пласта почвы от основной массы путем его отрыва. Для описания физической сущности явления используем гипотезу об

отделении клином подрезаемого пласта почвы путем его изгиба. При этом почву при моделировании будем рассматривать как однородную среду с равнопрочными свойствами во всем ее объеме, подвергаемом воздействию клина, но разными механическими характеристиками при сжатии и растяжении.

Значения предельно-допустимых напряжений определяются исходными свойствами обрабатываемой почвы [10, 11]. Для почв малосвязных или предельно обработанных значения предельно допустимых напряжений являются незначительными и процесс отделения пласта почвы происходит при меньших усилиях изгиба. Нормальные и касательные напряжения, возникающие в пласте почвы при изгибе, зависят от соотношения между длиной и толщиной обрабатываемого пласта почвы. С увеличением такого соотношения значения касательных напряжений снижаются, а нормальных – возрастают. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для малосвязных почв и почв с относительно малыми предельно допустимыми напряжениями длина образованного пласта почвы относительно небольшая. В этом случае преобладающими напряжениями в почве являются касательные напряжения. Как следствие, процесс отделения пласта почвы происходит путем сдвига [9, 12]. В связных почвах с относительно большими предельно допустимыми значениями напряжений разрушение происходит при больших значениях изгиба, то есть при большой длине отделяемого пласта почвы. В таком случае преобладающими являются нормальные напряжения и отделение пласта почвы происходит за счет отрыва его от основной массы. Принятая гипотеза [11] физической модели разрушения почвы под действием клина достаточно хорошо согласуется с результатами многочисленных исследований. Кроме того, эта гипотеза позволяет учитывать, что на величину нормальных и касательных напряжений в отделяемом пласте почвы оказывает влияние и глубина обработки почвы. Поэтому процесс образования комка путем отделения его от основной массы сдвигом или отрывом определяется не только физико-механическими свойствами почвы, параметрами рабочего органа, но и глубиной хода его в почве.

С энергетической точки зрения более совершенен процесс, в ходе которого скалывание почвы проходит путем отрыва. Поэтому далее будем исследовать такую пространственную ориентацию клина, при которой наблюдается этот эффект. Он обусловлен преобладанием нормальных напряжений над касательными. Будем полагать, что действующий на почвенный пласт клин вызывает в нем только изгибающий момент, а поперечные и нормальные силы малы до такой степени, что их можно не учитывать, то есть имеет место «чистый» изгиб [13].

3. Цель и задачи исследований

Целью работы являются теоретические исследования процесса воздействия клина на почву, в результате которых, используя методы вариационного исчисления, необходимо построить рациональные профили долота чизельной лапы и долота чизельного рабочего

органа. Использование метода вариационного исчисления, позволяет снизить энергоёмкость почвообрабатывающих рабочих органов на 20...30 %.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- обосновать профиль долота, обеспечивающий снижение его энергоёмкости;
- с помощью вариационных методов исчисления провести расчет рациональных параметров чизельных рабочих органов;
- обосновать профиль крыла наральника;
- экспериментально исследовать процесс взаимодействия клина с почвой.

4. Теоретические исследования параметров воздействия клина в почве с их экспериментальной идентификацией

4.1. Обоснование параметров чизельных рабочих органов

Обоснование геометрических параметров долота чизельной лапы производили с использованием прямого метода вариационного исчисления [8, 14–16]. Рациональный профиль долота определяли, задавшись условием, что его кривая проходит через фиксированные точки с заданным углом наклона в начальной точке. В этом случае вариационная задача ограничивается через две фиксированные точки и выходящих из начальной под заданным углом необходимо определить кривую, которая соответствует профильной линии долота чизельного рабочего органа с минимальным тяговым сопротивлением. В такой постановке задачи при $H_0=0$; $X_k=0,5$ м; $Z_k=0,3$ м; $f=0,5$; $Z'_0=0,57$; $X_0=0$; $Z_0=0$, получили профиль долота.

Обоснование профиля долота проводили с учётом его совместной работы с наральником при фиксированных граничных условиях и угле наклона касательной в начальной точке равном 30° . При локальном рыхлении почвы нет необходимости совместно с долотом использовать наральник и тем самым увеличивать тяговое сопротивление чизельного рабочего органа. В таком случае рациональный профиль долота целесообразно искать с одной плавающей граничной точкой.

Угол наклона касательной в начальной точке искомой кривой задавался на основании соответствующего угла наклона долота серийного рабочего органа чизельного плуга ПЧ-2,5, Geascon SS-7NR [17] и др. Однако анализ зависимостей [8] максимальных напряжений на растяжение в почве, возникающих под действием клина, показывает, что даже при относительно высоком допустимом напряжении $[\sigma]_p=8$ кН/м² при глубинах хода клина от 0,16 до 0,20 м оно достигается при угле, значение которого находится в интервале между 24 и 30° . Тогда постановка задачи формулируется следующим образом. Необходимо среди множества кривых, выходящих из заданной точки под углом 27° , установленных экспериментально и проходящих через вторую граничную точку, смещающуюся по прямой $Z=Z_k$, найти кривую, которая описывает профиль долота с минимальным тяговым сопротивлением.

Для решения задачи воспользуемся методом прямого вариационного исчисления. Искомый профиль задаём в виде уравнения, отвечающего условиям постановки задачи [4, 14, 18]:

$$Z = -C_1 \left\{ \exp[C_2 X^2 (X_k - X)] - 1 \right\} + Z'_0 X + \frac{X^2 (Z_k - X'_k Z'_0)}{X_k^2}, \quad (1)$$

где C_1, C_2 – искомые коэффициенты.

Значения постоянных коэффициентов C_1, C_2 и граничной точки X_k находим из решения следующей интегральной системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_x}{\partial C_i} &= \text{br} \vartheta^2 \int_{x_0}^{x_k} \left\{ \frac{(f+Z') \cdot Z'}{Z_k (f+(Z')^2)} \cdot \frac{\partial Z}{\partial C_i} + \left[1 - \frac{Z-H_0}{Z_k} \right] \right\} \times \\ &\times \left[\frac{(3+(Z')^2)(f+Z')}{(1+(Z')^2)^2} + \frac{Z'}{1+(Z')^2} \right] \frac{\partial Z'}{\partial C_i} \{ (Z')^2 dx + \\ &+ F \Big|_{x=x_k} \frac{\partial X_k}{\partial C_i} = 0; \\ i &= \overline{1;2}; \\ X_k &= \frac{F_1(f)}{2C_1 C_2} + \left[\left(\frac{F_1(f)}{2C_1 C_2} \right)^2 + \frac{Z_k}{C_1 C_2} \right]; \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$F_1(f) = C_1 C_2 X_k + Z_k / X_k.$$

$$\begin{aligned} Z' &= -2XC_1 C_2 \left(X_k - \frac{3}{2}X \right) \left\{ \exp[C_2 X^2 (X_k - X)] - 1 \right\} + \\ &+ Z'_0 + \frac{2X(Z_k - X'_k Z'_0)}{X_k^2}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial C_1} = -\exp[C_2 X^2 (X_k - X)] + 1;$$

$$\frac{\partial Z}{\partial C_2} = -C_1 X^2 (X_k - X) \exp[C_2 X^2 (X_k - X)];$$

$$\frac{\partial Z'}{\partial C_1} = -2XC_2 \left(X_k - \frac{3}{2}X \right) \left\{ \exp[C_2 X^2 (X_k - X)] - 1 \right\};$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z'}{\partial C_2} &= -2XC_1 \left(X_k - \frac{3}{2}X \right) \times \\ &\times \left\{ \exp[C_2 X^2 (X_k - X)] \cdot [C_2 X^2 (X_k - X) + 1] - 1 \right\}. \end{aligned}$$

Систему уравнений решали численным методом, используя язык Basic, при $f=0,5$ м; $Z'_0=0,51$; $X_0=0$; $Z_0=0$; $Z_k=0,3$ м; $H_0=0$.

В результате решения системы уравнений (2) получили значения коэффициентов C_1, C_2 и конечной координаты X_k , которые составили соответственно 1,425; 2,850 и 0,260 м.

Уравнение кривой, описывающей профиль долота чизельного тягового сопротивления, запишется:

$$\begin{aligned} Z &= -1,425 \left\{ \exp[2,850 X^2 (0,26 - X)] - 1 \right\} + \\ &+ 0,51X + 2,47X^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Кривая линия, построенная по уравнению (3), отображает профиль долота чизельного рабочего органа (рис. 1).

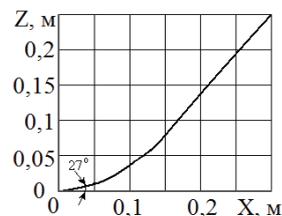


Рис. 1. Профиль долота чизельной лапы

Качество обработки почвы перед посевом определяется глубиной её обработки чизельными рабочими органами и расстоянием между ними. Причем эти два параметра связаны между собой. Увеличение глубины обработки почвы ведёт к повышению затрат энергии и ухудшает крошение почвы. Уменьшение глубины обработки почвы вызывает необходимость более плотной расстановки чизельных рабочих органов с целью исключения огрехов между ними. Это также увеличивает затраты энергии на обработку почвы и на забивание рабочих органов пожнивными остатками и сорняками. Деформация почвы под действием наральников чизельных рабочих органов распространяется под углом. Поэтому конструктивное обоснование системы расстановки чизельных рабочих органов является важным для совершенствования рабочего процесса. Анализ процесса работы чизельных лап показывает, что их задача – обеспечивать заданную глубину хода в условиях повышенной плотности почвы, а также создать условия для улучшения накопления в почве влаги и воздуха. В связи с этим нет необходимости перекрытия деформаций в почве, которые распределяются под воздействием чизельных лап.

Глубина хода чизельных рабочих органов и расстояние между обработанными полосами в условиях локального рыхления почвы определяется природно-климатическими условиями зоны, состоянием почвы и требованиями выращиваемой культуры. С одной стороны, увеличение такого расстояния способствует снижению затрат энергии на обработку почвы, с другой – ограничивается необходимостью создания условий для поддержания плодородия почвы. Поэтому выбор рационального соотношения между глубиной рыхления и расстоянием между взрыхленными полосами имеет важное эколого-экономическое значение, особенно в условиях минимальных систем обработки почвы.

Для обоснования параметров чизельной лапы, в частности геометрического профиля стойки, используем прямой метод вариационного исчисления. Обоснование наральника чизельной лапы проводили в два этапа. На первом этапе обосновывали профиль долота наральника с учетом зрения обеспечения необходимого углубления в почву при минимальных расходах энергии, на втором – профиль наральника минимальной энергоёмкости по результатам исследований, связанных с обоснованием долота.

Для сохранения надежности чизельных рабочих органов при углублении их в почву будем вести поиск рационального профиля, кривая которого проходит через фиксированные точки с заданным углом наклона касательной в исходной точке. Тогда вариационная задача формулируется таким образом. Среди множества кривых, проходящих через фиксированные точки и выходящих из начальной под заданным углом, найти такую кривую, которая бы отвечала профильной линии чизельной стойки минимального тягового сопротивления.

Энергетический функционал, который определяет тяговое сопротивление чизельной лапы, записываем в следующем виде [18]:

$$R_x = b \cdot \rho \cdot \vartheta^2 \int_{x_0}^{x_k} \left[1 - \frac{Z - H_0}{Z_k} \right] \frac{Z^3 (f + Z')}{1 + Z'^2} dX. \quad (4)$$

Уравнения кривой будем искать в виде уравнения, которое бы удовлетворяло заданной постановке задачи, то есть кривая должна проходить через координаты предельных точек с заданным углом касательной в исходной точке:

$$Z = -C_1 \left\{ \exp \left[C_2 X^2 (X_k - X) \right] - 1 \right\} + Z'_0 X + \frac{X^2 (Z_k - X_k Z'_0)}{X_k^2}, \quad (5)$$

где C_1, C_2 – искомые коэффициенты. Тогда

$$Z' = -2XC_1 C_2 \left(X_k - \frac{3}{2}X \right) \left\{ \exp \left[C_2 X^2 (X_k - X) \right] - 1 \right\} + 2X(Z_k - X'_k Z'_0) + Z'_0. \quad (6)$$

После введения в уравнение (4) выражений формул (5) и (6) задача сводится к определению коэффициентов C_1 и C_2 . Для этого необходимо взять производные от полученных уравнений по коэффициентам и приравнять их к нулю

$$\frac{\partial R_x}{\partial C_3} = \hat{\alpha} \rho \vartheta^2 \int_{x_0}^{x_k} \left\{ \frac{(f + Z') \cdot Z'}{Z_k (f + Z'^2)} \cdot \frac{\partial Z}{\partial C_1} + \left[1 - \frac{Z - H_0}{Z_k} \right] \times \left[\frac{(3 + Z'^2)(f + Z')}{(1 + Z'^2)^2} + \frac{Z'}{1 + Z'^2} \right] \frac{\partial Z'}{\partial C_1} \right\} Z'^2 dx = 0, \quad (7)$$

$$u = 1; 2.$$

В результате численного решения системы уравнений (7) при $H_0 = 0; X_k = 0,5 \text{ м}; Z = 0,3 \text{ м}; f = 0,5 \text{ м}; Z'_0 = 0,57 \text{ м}; X_0 = 0; Z_0 = 0$ получим значение коэффициентов C_1 и C_2 , которые соответственно равны 1,160 и 1,298.

Тогда искомый профиль долота опишется уравнением:

$$Z = -1,16 \left\{ \exp \left[1,298 X^2 (0,5 - X) \right] - 1 \right\} + 0,57X + 0,06X^2. \quad (8)$$

Кривая линия, построенная по уравнению (8), отображает профиль долота чизельного рабочего органа (рис. 2).

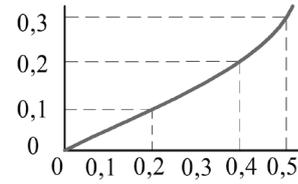


Рис. 2. Рациональный профиль долота чизельного рабочего органа

На поверхности крыла наральника выделяем элементарную площадку (рис. 2), на которую действует удельное давление почвы q и удельная сила трения dF . Последняя направлена в сторону движения пласта почвы на поверхности наральника. Однако профиль поверхности наральника нам неизвестный и определить закономерность движения пласта почвы по нему трудно. Поэтому для упрощения решения задачи будем считать, что элементарная сила трения направлена по касательной к искомой поверхности и находится в плоскости, параллельной плоскости XOZ . Последнее предположение основывается на том, что крыло наральника расположено близко к лемеху лобового резания.

Постановку вариационной задачи формулируем следующим образом. Из большого количества поверхностей $Z = f(x, y)$, которые проходят через точки O, C, B и A , найти ту, которая бы обеспечила функционалу (9) экстремум. Для решения задачи используем метод вариационного исчисления Ритца и метод конечных элементов [19].

Энергетический функционал для определения тягового сопротивления крыла наральника имеет вид [18, 19]:

$$R_x = \int_0^{x_k} \int_0^{y_k} (q_x + dF) dX \cdot dY, \quad (9)$$

$$q_x = \rho \vartheta^2 \left[1 - \frac{Z}{H} \right] \frac{Z_x^4}{(1 + Z_x'^2) \cdot (1 + Z_x'^2 + Z_y'^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (10)$$

$$dF = f \rho \vartheta^2 \left[1 - \frac{Z}{H} \right] \frac{Z_x^3}{(1 + Z_x'^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (11)$$

где H – глубина хода крыла наральника.

Спроектируем искомую поверхность на плоскость XOY (рис. 3).

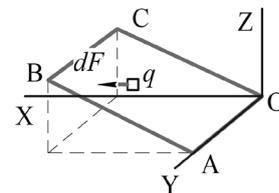


Рис. 3. Схема к обоснованию профиля крыла наральника

Уравнения линий, которые ограничивают проекцию поверхности крыла, запишутся так [5, 17, 18]:

$$v = 0; v = \text{все}; x = x_a; x = 0. \quad (12)$$

Кусочно-линейную аппроксимацию искомой поверхности представляем в виде:

$$Z = \sum_{k=1}^m C_k \varphi_k, \tag{13}$$

где C_k – искомые коэффициенты; φ_k – базисные функции.

Базисные функции являются линейными, кусочно-непрерывными и равны единице в узлах и нулю за областью определения. Базисные функции определяются для всех элементов m , которые имеют связи с узлом k :

$$\varphi_k = \sum_{n=1}^m \varphi_k^{ej}, \tag{14}$$

где $m=20$.

Присваиваем номера узлам i, j и k с суровым сохранением порядка движения последовательности против часовой стрелки указанных индексов.

Система функций формы имеет вид [16, 17]:

$$\varphi_j^{\circ 0} = \begin{cases} -\frac{1}{2S} [(X-X_j) \cdot (Y_k - Y_j) - (Y - Y_j) \cdot (X_k - X_j)] & \text{при } (X; Y) \in \ell^0, \\ 0 & \text{при } (X; Y) \notin \ell^0, \end{cases} \tag{15}$$

$$\varphi_j^{\circ 0} = \begin{cases} -\frac{1}{2S} [(X-X_k) \cdot (Y_i - Y_k) - (Y - Y_k) \cdot (X_i - X_k)] & \text{при } (X; Y) \in \ell^0, \\ 0 & \text{при } (X; Y) \notin \ell^0, \end{cases} \tag{16}$$

$$\varphi_k^{\circ 0} = \begin{cases} -\frac{1}{2S} [(X-X_i) \cdot (Y_j - Y_i) - (Y - Y_i) \cdot (X_j - X_i)] & \text{при } (X; Y) \in \ell^0, \\ 0 & \text{при } (X; Y) \notin \ell^0. \end{cases} \tag{17}$$

Для нахождения значений коэффициентов C_k , которые бы обеспечили функционалу минимальное значение, про дифференцируем уравнение по C_k , приравнявая их к нулю

$$\frac{\partial RX}{\partial C_k} = \int_0^{X_A} \int_0^{Y_A} \frac{\partial (q_x + dF)}{\partial C_k} dX dY = 0, k = \overline{1, 20}. \tag{18}$$

Численное решение выполняли, используя язык Basic [20], при $X_a=0,33$ м; $Y_c=0,14$ м; $f=0,5$; $dx=0,065$; $dy=0,035$; $Z_1=0,08$; $Z_4=0$; $Z_2=0,03$; $Z_3=0,05$; $Z_{17}=0,08$ м; $Z_{20}=0,08$; $H=0,16$ м; $Z_5=0$; $Z_{12}=0$; $Z_{13}=0$.

Структурный состав почвы после возделывания серийными и экспериментальными наральниками приведен в табл. 1. Энергетические показатели оценивались величиной тягового сопротивления.

Таблица 1

Структурный состав почвы после возделывания серийным и экспериментальным наральником

Тип наральника	Фракции, мм					к-т структур.
	>30	30-20	20-10	10-0,25	<0,25	
Серийный	13,30	11,85	11,90	62,55	0,35	1,64
Экспериментальный	11,50	11,10	14,85	62,10	0,29	1,71

Анализом данных табл. 1 установлено, что коэффициент структуры почвы после его возделывания чизельными серийными и экспериментальными наральниками имеет почти одинаковое значение.

Допустимые напряжения на разрыв, которые возникают в почве в зависимости от ее типа и свойств, обусловленных влажностью и температурой, находятся в пределах от 2 до 6 кН/м². При различных прочностных значениях допустимых напряжений почвы на разрыв (рис. 4) разрушение ее под действием клина в начальный момент движения происходит при углах крошения более 18°, что подтверждено экспериментальными исследованиями [16].

При углах крошения 6° процесс разрушения целостного слоя происходит при глубинах хода клина более 0,25 м, для 12° – более 0,12 м и для 18° – более 0,07 м. Если допустимые напряжения в почве на разрыв будут иметь максимальное значение, то в начальный момент движения клина при углах крошения 6° и 12° до глубины его хода равной 0,3 м, разрушения подрезаемого пласта почвы не происходит. При углах крошения 18°, 24°, 30°, 36°, 42° и 48° разрушение пласта происходит при глубинах хода клина соответственно более 0,20; 0,15; 0,12; 0,09; 0,07 и 0,06 м [14, 16].

Допустимые напряжения сдвига в почве изменяются в пределах 6...15 кН/м². Из рис. 5 видно, что в начальный момент движения клина напряжения на разрыв имеют величину, более близкую к предельной.

Расчетные величины длины сколотого пласта почвы при различных глубинах обработки и углах крошения клином в зависимости от предельно допустимых значений напряжений на разрыв почвы показаны на рис. 6-8.

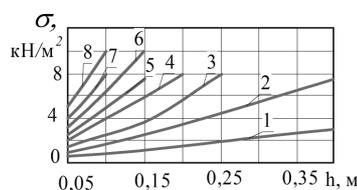


Рис. 4. Зависимость максимальных напряжений растяжения в почве, возникающих под воздействием клина от глубины его хода при различных углах крошения: 1 – α=6°; 2 – α=12°; 3 – α=18°; 4 – α=24°; 5 – α=30°; 6 – α=36°; 7 – α=42°; 8 – α=48°

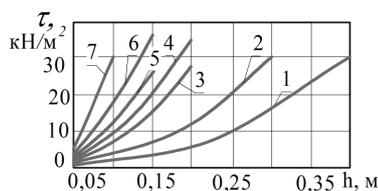


Рис. 5. Зависимость максимальных касательных напряжений в почве возникающих под воздействием клина при изменении глубины его хода и различных углах крошения: 1 – α=6°; 2 – α=12°; 3 – α=18°; 4 – α=24°; 5 – α=30°; 6 – α=36°; 7 – α=42°

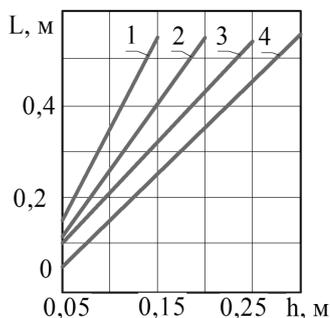


Рис. 6. Зависимость длины сколотого пласта почвы от глубины хода клина для различных углов крошения при допустимом напряжении на растяжение 5 кПа: 1 – $\alpha=18^\circ$; 2 – $\alpha=24^\circ$; 3 – $\alpha=30^\circ$; 4 – $\alpha=36^\circ$

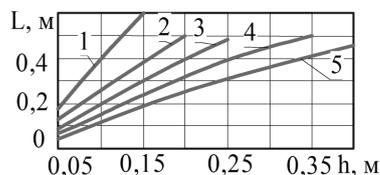


Рис. 7. Зависимость длины снятого пласта почвы от глубины хода клина для различных углов крошения при допустимом напряжении на растяжение 3,5 кПа: 1 – $\alpha=12^\circ$; 2 – $\alpha=18^\circ$; 3 – $\alpha=24^\circ$; 4 – $\alpha=30^\circ$; 5 – $\alpha=36^\circ$

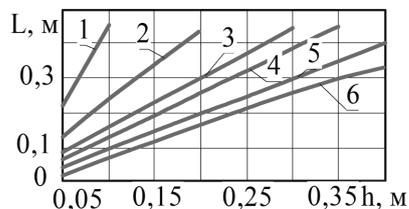


Рис. 8. Зависимость длины снятого пласта почвы от глубины хода клина для различных углов крошения при допустимом напряжении на растяжение 2 кПа: 1 – $\alpha=6^\circ$; 2 – $\alpha=12^\circ$; 3 – $\alpha=18^\circ$; 4 – $\alpha=24^\circ$; 5 – $\alpha=30^\circ$; 6 – $\alpha=36^\circ$

Из графиков видно, что с увеличением глубины хода клина и уменьшением угла крошения размер образованных комков возрастает, причем интенсивнее с увеличением прочностных свойств почвы на разрыв.

С целью снижения размеров комков при обработке почвы, и с увеличением ее глубины угол крошения почвы клином целесообразно увеличивать [16, 19].

На почвах с высокими прочностными свойствами на разрыв клинья с углом крошения менее 18° целесообразно использовать для обработки почвы на глубину до 0,1 м, со средними – до 0,15 м и с низкими – до 0,24 м.

На рис. 9, 10 показаны зависимости длины сколотого пласта почвы от глубины обработки почвы при различных углах крошения и разных допустимых значениях прочности почвы на сдвиг. Характер влияния глубины хода клина и угла его крошения на длину сколотого пласта почвы такой же, как и при разрушении последнего путем разрыва [16].

Таким образом, с увеличением глубины хода клина нормальные и касательные напряжения в почве под его воздействием возрастают. Если допустимые нормальные напряжения в почве более 2 кН/м², то клинья

с углами крошения до 12° при глубине хода менее 0,13 м не обеспечивают создания в почве их предельных величин и скалывания пласта почвы [18].

Для обработки почвы с допустимым напряжением на разрыв 6 кН/м² при глубине обработки 0,15 м угол крошения должен превышать 24° , а при глубине 0,22 м – 18° .

Для малосвязных почв с предельным допустимым касательным напряжением около 5 кН/м² процесс скалывания пласта почвы клином с малыми углами крошения 6° и 12° начинается при глубинах хода более 0,18 и 0,13 м соответственно. При обработке почв на 0,15 м с предельным допустимым значением 15 кН/м² граничных его величин достигают клином с углом крошения более 18° , а при глубине 0,22 м – более 12° .

На рис. 11 приведены зависимости длины сколотого пласта почвы при различных углах крошения для максимально допустимых значений равных 13,5 кПа. Характер влияния угла крошения и глубины хода клина на длину сколотого пласта такой же, как и под воздействием нормальных напряжений на разрыв и касательных напряжений на сдвиг [19].

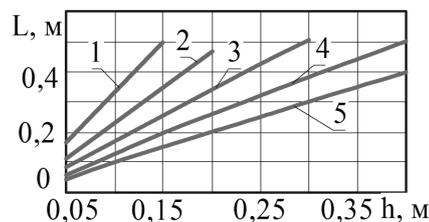


Рис. 9. Зависимость длины сколотого пласта почвы от глубины обработки почвы при различных углах крошения для допустимого касательного напряжения 10,5 кПа: 1 – $\alpha=12^\circ$; 2 – $\alpha=18^\circ$; 3 – $\alpha=24^\circ$; 4 – $\alpha=30^\circ$; 5 – $\alpha=36^\circ$

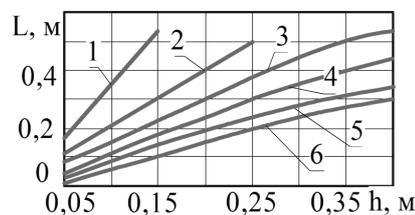


Рис. 10. Зависимость длины сколотого пласта почвы от глубины обработки почвы при различных углах крошения для допустимого касательного напряжения 6 кПа: 1 – $\alpha=6^\circ$; 2 – $\alpha=12^\circ$; 3 – $\alpha=18^\circ$; 4 – $\alpha=24^\circ$; 5 – $\alpha=30^\circ$; 6 – $\alpha=36^\circ$

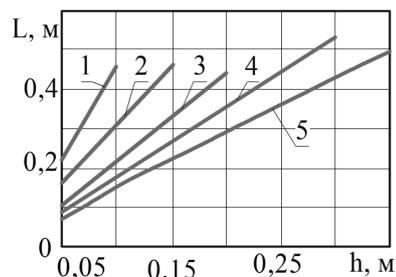


Рис. 11. Зависимость длины сколотого пласта почвы от глубины хода клина при различных углах его крошения для максимально допустимых значений: 1 – $\alpha=12^\circ$; 2 – $\alpha=18^\circ$; 3 – $\alpha=24^\circ$; 4 – $\alpha=30^\circ$; 5 – $\alpha=36^\circ$

Качество крошения почвы, которое определяется размерами комков и глыб, образованных под действием почвообрабатывающих рабочих органов, зависит от пройденного ими пути до достижения в почве предельных напряжений. Увеличение пути прохода рабочих органов до начала процесса скалывания пласта почвы способствует образованию комков и глыб более крупных размеров. Исследования показали, что клин в зависимости от угла крошения, прочностных показателей почвы и глубины обработки может создавать в ней необходимые для скалывания напряжения в начальный момент движения после прохода пути равного 10 мм и более. Напряжения в почве возрастают с увеличением угла крошения и глубины обработки.

На почвах с высокими прочностными свойствами плоскорежущие лапы с углом крошения менее 18° целесообразно использовать для обработки почвы на глубину до 0,10 м. Тогда как, на почвах со средними прочностными свойствами рекомендованная глубина составляет до 0,15 м, а с низкими – до 0,24 м. В начальный момент движения клина напряжения сдвига по отношению к напряжениям на разрыв имеют величину более близкую к предельной.

Поэтому на почвах малосвязных и при малых глубинах обработки почвы преобладающим видом деформации является сдвиг.

Процесс крошения почвы клином путём его отрыва или сдвига определяется физико-механическими свойствами почвы, углом крошения и глубиной обработки почвы [12, 16, 18].

4. 2. Экспериментальные исследования технологических процессов и рабочих органов машин для обработки почвы

Почву перед помещением в ёмкость стенда измельчали и просеивали на решетке с круглыми отверстиями диаметром 10 мм. Затем почву перемешивали и увлажняли до 25...27 % влажности. После увлажнения почву засыпали в ёмкость слоями толщиной 0,02 м. Перед засыпкой почвы и после каждого слоя закладывали меловую прослойку. Почву в ёмкости просушивали до влажности 24 % и проводили эксперимент в соответствии с матрицей, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

Матрица эксперимента по изучению процесса взаимодействия клина с почвой

№ пп	Глубина хода клина, м	Угол крошения клина, град.
1	0,04	15
2	0,06	15
3	0,08	15
4	0,10	15
5	0,04	25
6	0,06	25
7	0,08	25
8	0,10	25
9	0,04	35
10	0,06	35
11	0,08	35
12	0,10	35

Перед проведением эксперимента в ёмкости стенда с помощью лопаты выполняли вертикальный срез почвы, подводили до него клин и устанавливали заданные углы крошения и глубины хода (рис. 12).



Рис. 12. Схема положения клина перед началом проведения эксперимента

В процессе проведения эксперимента определяли угол скалывания почвы, пройденный путь клином до начала процесса скалывания и преобладающий вид деформации почвы, который приводит к скалыванию почвы сдвигом или отрывом.

Тележку почвенного канала с клином перемещали с малой скоростью ($v < 0,05$ м/с) до момента начала процесса скалывания пласта почвы клином, который определялся визуально. После остановки тележки пройденный клином путь фотографировали и измеряли с помощью линейки. Углы скалывания пласта почвы определялись с помощью транспортира на фотографии. О преобладающем виде деформации почвы судили по характеру изменения положений меловых прослоек ёмкости стенда.

На рис. 13, 14 показаны процессы разрушения путём отрыва и сдвига соответственно. При сдвиге пласта почвы характер изменения формы меловой прослойки по направлению поверхности скалывания одинаковый по всем слоям, расположенным по глубине обработки. При отрыве начинается процесс разрушения меловой прослойки возле лезвия клина.



Рис. 13. Схема процесса скалывания пласта почвы путём отрыва



Рис. 14. Схема процесса скалывания пласта почвы путём сдвига

С целью снижения влияния на процесс скалывания пласта почвы случайных факторов порядок проведения опытов рандомизировали. Эксперимент по изучению процесса взаимодействия клина с почвой проводили при влажности почвы 24 % в двукратной повторности.

Изучали 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 характер. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 3.

5. Обсуждение результатов исследований

Статистическая обработка экспериментальных данных показывает [13, 16], что фактор влияния глубины хода клина на величину пройденного пути до начала процесса скалывания пласта почвы составляет 72,67 %, угла крошения – 17,45 %, их парного взаимодействия – 2,38 %. Статистическая обработка результатов проводилась с помощью двухфакторного дисперсионного анализа [20].

Тяговое сопротивление чизельных рабочих органов с долотами и наральниками приведено в табл. 4.

Таблица 4

Тяговое сопротивление чизельных рабочих органов, Н

Вид долота	Повторность			Среднее
	1	2	3	
Серийное	1180	1290	1150	1207
Экспериментальное	880	910	990	927
Экспериментальное для локального рыхления почвы	830	900	880	870

Таблица 3

Результаты эксперимента по изучению процесса взаимодействия клина с почвой

№ пп	Глубина хода клина, м	Угол крошения, град.	Пройденный путь до начала процесса скалывания, м·10 ⁻³			Угол скалывания, град.			Вид процесса скалывания
			Повторности			Повторности			
			1	2	Сред.	1	2	Сред.	
1	0,04	15	30	32	31,0	40	41	40,5	Сдвиг
2	0,06	15	40	41	40,5	42	43	42,5	Отрыв
3	0,08	15	55	53	54,0	49	48	48,5	Отрыв
4	0,10	15	62	59	60,5	52	51	51,5	Отрыв
5	0,04	25	26	24	25,0	37	38	37,5	Сдвиг
6	0,06	25	33	31	32,0	43	42	42,5	Отрыв
7	0,08	25	43	44	43,5	48	45	46,5	Отрыв
8	0,10	25	51	49	50,0	52	48	50,0	Отрыв
9	0,04	35	22	23	22,5	35	36	35,5	Сдвиг
10	0,06	35	28	26	27,0	43	39	41,0	Отрыв
11	0,08	35	35	37	36,0	48	46	47,0	Отрыв
12	0,10	35	42	44	43,0	51	52	51,5	Отрыв

Анализ данных табл. 4 показывает, что чизельный рабочий орган с экспериментальным долотом в сравнении с серийным имеет меньшее сопротивление приблизительно на 24 %, а с экспериментальным долотом для локального рыхления почвы – на 28 %.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью однофакторного дисперсионного анализа [20]. Дисперсионный анализ полученных данных показал, что они достоверны с вероятностью 95 %. Сравнение тяговых сопротивлений серийного и экспериментальных долот свидетельствует о снижении энергоемкости последних. Так, в сравнении с серийным долотом, экспериментальное долото имеет сопротивление ниже на 23 %, а долото для локального рыхления – на 28 %.

Дисперсионный анализ данных на изучение влияния профиля широких наральников на их тяговое сопротивление показывает, что доля влияния фактора равняется 97,04 %, полученные данные достоверны с вероятностью 95 %.

Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают достоверность результатов теоретических исследований по обоснованию профиля долота чизельного рабочего органа с точки зрения снижения их энергоемкости с сохранением качества крошения почвы.

Структурный состав почвы после обработки чизельным рабочим органом с экспериментальным долотом приведен в табл. 5.

Таблица 5

Структурный состав почвы после обработки чизельным рабочим органом с экспериментальным долотом

№ повторности	Фракции, мм					к-т структ.
	>30	30–20	20–10	10–0,25	<0,25	
1	17,32	13,58	17,21	51,18	0,7	1,04
2	17,96	21,56	14,37	52,69	0,59	1,10
Сред.	17,64	17,57	15,79	52,28	0,64	1,07

На основании результатов исследований [21], сплошное рыхление почвы культиваторами можно заменить локальным чизелеванием. При этом наральники чизельных рабочих органов необходимо заменить на долота. Последнее способствует снижению сопротивления рабочих органов в 1,8 раза.

Следует отметить, что в условиях Лесостепи Украины технологии обработки почвы сегодня в основном базируются на выполнении относительно большого количества операций, что способствует увеличению расхода энергии и снижению плодородия почвы. Кроме того, при обработке почвы традиционными орудиями не обеспечивается создание наиболее благоприятных условий для прорастания семян и развития растений. Поэтому рассмотренная задача повышения

эколого-экономической эффективности возделывания сельскохозяйственных культур путем развития теории процесса взаимодействия с почвой клина может считаться перспективной. Рациональное значение угла крошения почвы в зависимости от ее свойств, сроков и глубины обработки можно обосновать с помощью полученной математической модели, составленной на основании гипотезы об отделении клином пласта связанной почвы путем её изгиба.

6. Выводы

1. На основании гипотезы об отделении клином пласта связанной почвы путём её изгиба получена математическая модель для определения нормальных и касательных напряжений в почве под воздействием клина. Показано, что процесс крошения почвы клином путём отрыва или сдвига определяется не только физико-механическими свойствами почвы и углом крошения, но и глубиной обработки. Для снижения размеров комков при обработке почвы с увеличением глубины её проведения угол крошения целесообразно увеличивать. Для обработки почвы с высокими прочностными свойствами (черноземы среднего и тяжелого механического состава с влажностью менее 22 %) плоскорезущие лапы с углом крошения менее 18° целесообразно использовать для обработки на глубину до 0,10 м, почвы со средними прочностными свойствами – до 0,15 м, почвы с низкими прочностными свойствами – до 0,24 м. Полученная математическая модель, которая описывает 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.

2. Обоснован профиль долота с точки зрения снижения его энергоемкости. Экспериментально установлено, что величина угла скалывания почвы практически не зависит от угла крошения пласта почвы и в основном определяется глубиной хода клина. Увеличение глубины обработки почвы способствует возрастанию угла скалывания. При этом 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.

3. Экспериментальные исследования показали, что совершенствование профиля долота чизельного рабочего органа с точки зрения снижения тягового сопротивления существенно влияет на качество крошения почвы не оказывает. При этом установлено, что угол распространения деформаций в сторону под действием долота в основном зависит от глубины хода его в почве и практически не зависит от угла крошения, что подтверждает достоверность результатов исследований по изучению процесса взаимодействия с почвой клина. Угол распространения деформаций в почве находится в пределах 45...75°.

Литература

1. Кім, В. В. Деякі аспекти проблем тракторо- та сільгоспмашинобудування України [Текст] / В. В. Кім // Пропозиція. – 2001. – № 8-9. – С. 92–93.

2. Медведєв, В. В. Чтобы не убывало плодородие [Текст] / В. В. Медведєв, Г. М. Кривоносова, П. И. Кузьба, В. Ф. Пащенко и др. – К.: Урожай, 1989. – 191 с.
3. Горячкин, В. П. Собрание сочинений. Т.2. 2-е изд. [Текст] / В. П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – 455 с.
4. Кушнарєв, А. С. Механика почв: задачи и состояние работ [Текст] / А. С. Кушнарєв // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 1987. – № 3. – С. 9–13.
5. Ветохін, В. П. Проектування глибокорозпушувачів з урахуванням деяких аспектів деформування ґрунту [Текст]: зб. наук. пр. / В. П. Ветохін // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Кіровоградського національного технічного університету. – 2008. – Вип. 20. – С. 104–109.
6. Tamás, K. Modelling soil–sweep interaction with discrete element method [Text] / K. Tamás, I. J. Jóri, A. M. Mouazen // Soil and Tillage Research. – 2013. – Vol. 134. – P. 223–231. doi: 10.1016/j.still.2013.09.001
7. Дринча, В. М. Агротехнические аспекты развития повозащитных технологий [Текст]: монография / В. М. Дринча, И. Б. Борисенко, Ю. Н. Плєскачев; под ред. В. М. Кряжкова. – Волгоград: Перемена, 2004. – 145 с.
8. Корниєнко, С. И. Обоснование параметров чизельных рабочих органов [Текст] / С. И. Корниєнко, В. Ф. Пащенко, В. И. Мельник, Е. Н. Огурцов // Инженерія природокористування. – 2014. – С. 74–79.
9. Рєвякин, Е. Л. Чизелевание почвы: состояние, перспективы и проблемы [Текст] / Е. Л. Рєвякин, Т. Н. Нино // Техника и оборудование для села. – 2005. – № 11. – С. 18–21.
10. Коршиков, А. А. О глубоком рыхлении почвы [Текст] / А. А. Коршиков, А. А. Михайлин // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2003. – № 4. – С. 28–30.
11. Bravo, E. L. Prediction model for non-inversion soil tillage implemented on discrete element method [Text] / E. L. Bravo, E. Tijssens, M. H. Suárez, O. Gonzalez Cueto, H. Ramon // Computers and Electronics in Agriculture. – 2014. – Vol. 106. – P. 120–127. doi: 10.1016/j.compag.2014.05.007
12. Труфанов, В. В. Глубокое чизелевание почвы [Текст] / В. В. Труфанов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 140 с.
13. Пащенко, В. Ф. Обґрунтування параметрів чизельних робочих органів комбінованої машини АГРО-3 [Текст] / В. Ф. Пащенко, В. В. Кім, В. М. Кіяшко // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. – 2004. – Вип. 7 (21). – С. 353–358.
14. Василенко, П. М. Применение методов вариационного исчисления к решению некоторых задач земледельческой механики [Текст] / П. М. Василенко // Труды КСХИ. – 1953. – Т. VI. – С. 133–150.
15. Пащенко, В. Ф. Вплив локального розпушення ґрунту на його фізико-механічні властивості [Текст] / В. Ф. Пащенко, М. П. Гусаренко, С. О. Дьяконов, Є. М. Огурцов // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник Харківського національного технічного сільського господарства ім. П.Василенка. – 2011. – Т. 1, Вип. 107. – С. 198–203.
16. Пащенко, В. Ф. Теория воздействия рабочих органов орудий на почву: монография [Текст] / В. Ф. Пащенко, С. И. Корниєнко, Н. П. Гусаренко. – Харьков: ХНАУ, 2013. – 89 с.
17. Пащенко, В. Ф. Решение задач земледельческой механики с использованием методов вариационного исчисления: монография [Текст] / В. Ф. Пащенко. – Харьков: ХНАУ, 2008. – 185 с.
18. Калиниченко, В. И. Введение в метод конечных элементов [Текст]: спец. курс / В. И. Калиниченко, В. И. Дорофеева, С. М. Шкрєбец. – Х.: ХГУ, 1993. – 40 с.
19. Кудрявцев, Е. М. Исследование операций в алгоритмах и программах [Текст] / Е. М. Кудрявцев. – М.: Радио и связь – 1984. – 184 с.
20. Гуков, Я. С. Обробіток ґрунту [Текст] / Я. С. Гуков // Технологія і техніка. – К.: Норапринт, 1999. – 276 с.