

УДК 631.3.02:531.01(075.8)

## Теоретические исследования технологического процесса почвообрабатывающей машины

В.Ф. Пащенко, В.В. Ким, А.А. Батулин

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
им. П. Василенка (г. Харьков, Украина), *mashinovikoristannia@ukr.net*

Рассматривается комбинированное почвообрабатывающее орудие перед рыхлительно-сепарирующим устройством которого предусмотрена установка лемеха. Функция лемеха — подрезание и подача почвы на рыхлительно-сепарирующее устройств. С целью минимизации тягового сопротивления орудия в целом профиль лемеха обоснован с применением метода прямого вариационного исчисления. В качестве начальных условий принято угол вхождения лемеха в почву и конечный угол в точке прилегания лемеха к стойке. Экспериментально показано, что лемех с теоретически обоснованным профилем по сравнению с прямолинейным лемехом имеет меньшее на 61,5% тяговое сопротивление.

**Ключевые слова:** почва, лемех, профиль лемеха, взаимодействие, тяговое сопротивление, граничные условия, сепарирующая решетка, энергия.

**Введение.** При движении машины (рис. 1) наральник 1, установленный на рабочем органе 2, обеспечивает заглубление их в уплотненный слой почвы. Подрезанная лемехом почва поднимается, частично крошится, загнутые концы лемеха не дают сходить пласту почвы с рабочего органа на стороны, при этом, не образовывая почвенные валковые полосы между лемехами и подает его на сепарирующую решетку 3.

Ножи 5 ротора 6, измельчая почву, продвигают ее по сепарирующей решетке, обеспечивая распределение комочков по толщине обрабатываемого слоя, необходимое для оптимизации физико-механических свойств почвы. Подрезанная растительность вместе с почвой, продвигаясь по сепарирующей решетке, сходит на поверхность обработанной почвы и частично ротором забрасывает на раму машины, что является нежелательным и не позволяет эффективно использовать её при относительно высоких сорных растениях [1 – 3].

**Постановка задачи.** Учитывая изложенное выше возникает необходимость в установке на машине дополнительной очистительной решетки ротора. Очистительная решетка должна обеспечить укладку на поверхности обработанной почвы, растительных остатков, которые в процессе испытания макета экспериментальной машины частично выбрасывались ножами ротора на раму машины.

Таким образом, для обеспечения минимальной энергоёмкости процесса работы машины предлагается теоретически обосновать и применить лемех минимального сопротивления.

С целью расширения функциональных возможностей комбинированной почвообрабатывающей машины необходимо разработать для ротора её рыхлительно-сепарирующего устройства очистительное приспособление от растительных остатков.

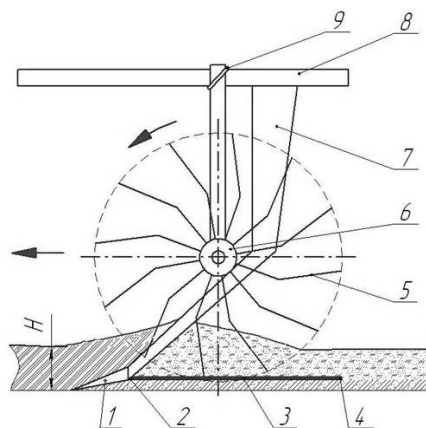


Рис. 1. Принципиальная схема машины

Лемех рыхлительно-сепарирующего устройства имеет продольную ось симметрии, поэтому мы рассмотрим только одно крыло. Предположим, что крыло лемеха движется в почве по всей длине на одной глубине, давление почвы на лапу постоянное. Считаем, что проекция давления почвы на направление движения есть величиной постоянной.

В качестве показателя энергоёмкости процесса условимся понимать силу сопротивления движения лемеха в почве ( $R_x$ ).

Профиль крыла лемеха (рис. 2) фиксируем в подвижной системе координат  $(x, y, z)$ .

Линии BC, CD, DA и AB ограничивают границы области проекции поверхности лемеха.

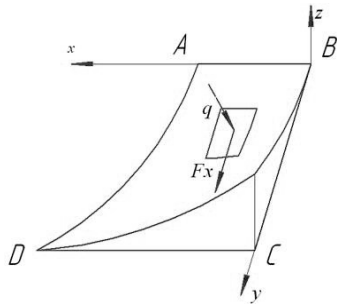


Рис. 2. Профиль крыла лемеха

Интегральное уравнение силы сопротивления движению лемеха в почве  $R_x$  записываем в следующем виде:

$$R_y = \int_0^{x_a} \int_0^{y_c} (q_y + F_y) dx dy + \int_{x_a}^{x_p} \int_0^{y^*} (q_y + F_y) dx dy - \int_{x_a}^{x_p} \int_0^{y_p} (q_y + F_y) dx dy \quad (1)$$

где  $y^* = -(229,5x^3 - 9,18x^2 + 36,89x^2 + 1,4756x - 12,000975x - 0,480039) / 0,0064$ ;

$q_y$  — нормальная удельная сила давления на лемех;  $F_y$  — сила трения рабочей поверхности подвижного лемеха по почве;  $dx, dy$  — элементарные приращения координат точки.

При этом нормальный единичный вектор  $q_1$  нормального давления почвы на поверхность рабочего органа записываем в проекции, как на оси координат [4]

$$q_1 = \{q_{1x}, q_{1y}, q_{1z}\}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} q_{1x} &= z'_x \left(1 + z_x'^2 + z_y'^2\right)^{-\frac{1}{2}}, \\ q_{1y} &= z'_y \left(1 + z_x'^2 + z_y'^2\right)^{-\frac{1}{2}}, \\ q_{1z} &= -\left(1 + z_x'^2 + z_y'^2\right)^{-\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда значение проекции на ось  $Ox$  нормального давления почвы на рабочий орган определяем по формуле

$$q_y = b\rho v^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \frac{z_y'^4}{\left(1 + z_y'^2\right)\left(1 + z_y'^2 + z_x'^2\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

где  $H$  — глубина хода лапы;  $b$  — ширина лемеха;  $z$  — координаты точек по оси  $Oz$ .

Проекцию на ось элементарной силы трения почвы по поверхности рабочего органа определяем по формуле:

$$F_{ly} = \tau_{ly} q f \cos \theta_2,$$

где  $\tau_{ly}$  — проекция касательного единичного вектора относительно поверхности рабочего органа на ось  $Oy$ ;  $\theta_2$  — максимально допустимый угол наклона касательной к оси  $Ox$ ;  $f$  — коэффициент трения почвы о лемех.

Единичный вектор в проекциях на оси координат записываем в виде:

$$\tau_1 = \{0, \tau_{1y}, \tau_{1z}\},$$

Проекцию единичного вектора на оси координат определим из системы уравнений:

$$\tau_{1y} + \tau_{1z} = 0, \quad \tau_{1y} q_{1y} + \tau_{1z} q_{1z} = 0.$$

После решения системы уравнений с учетом преобразований получим

$$\tau_{1y} = \pm \left(1 + \tau_y'^2\right)^{-1},$$

$$\tau_{1z} = \pm z'_y \left(1 + \tau_y'^2\right)^{-1}.$$

С учетом отрезка находим проекцию элементарной силы на ось  $Oy$

$$F_y = b f \rho v^2 \cos \theta_2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) z_y'^3 \left(1 + z_y'^2\right)^{-\frac{3}{2}}. \quad (5)$$

Область интегрирования (рис. 3) функционала (1) распределяем с равномерным интервалом на простые элементы в виде треугольников. Имеем 26 элементов и 24 угловых точек, которые называются узлами. Тогда частично линейная аппроксимация искомой поверхности может быть представлена линейной комбинацией функции

$$z = \sum_{k=1}^{24} C_k \varphi_k. \quad (6)$$

При этом она удовлетворяет следующим граничным условиям:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_8 = \varphi_9 = \varphi_{16} = \varphi_{17} = \varphi_{24} = 0;$$

$$C_{21} \varphi_{21} = 0,07 \text{ м}; \quad C_{22} \varphi_{22} = 0,055 \text{ м};$$

$$C_{23} \varphi_{23} = 0,026 \text{ м};$$

$$x_a = 0,04\text{м}; \quad y_c = 0,18\text{м}.$$

Каждая базисная функция  $\varphi_k$  линейная, частично непрерывная, которая равняется единице в узлах внутри области определения и равной нулю, за ее пределами.

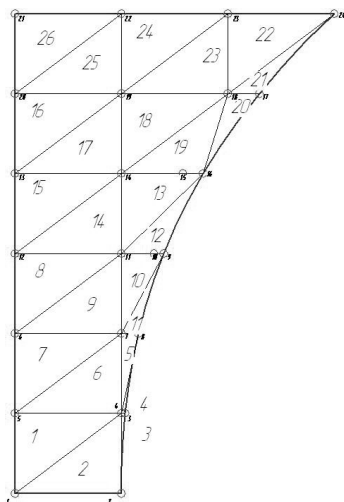


Рис. 3. Проекция поверхности крыла лемеха на плоскость  $xOy$

Определяем базисные функции для всех  $m$  элементов, которые имеют связь с узлом  $K$

$$\varphi_k = \sum_{j=1}^{30} \varphi_{kj}^l. \quad (7)$$

Дальше добавляем номера узлам  $i, j, k$ , с определенным сохранением для каждого элемента порядка следования против часовой стрелки указанных индексов и строим систему функций [4]:

$$\varphi_i^l = \begin{cases} -\frac{1}{2S} \left[ \frac{(x-x_j)(y_k-y_j) - (y-y_j)(x_k-x_j)}{-} \right] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o; \end{cases}$$

$$\varphi_i^l = \begin{cases} -\frac{1}{2S} \left[ \frac{(x-x_k)(y_j-y_k) - (y-y_j)(x_i-x_k)}{-} \right] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o; \end{cases}$$

$$\varphi_k^l = \begin{cases} -\frac{1}{2S} \left[ \frac{(x-x_i)(y_j-y_i) - (y-y_j)(x_j-x_i)}{-} \right] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o; \end{cases}$$

где  $S$  — площадь треугольника.

Дифференцируя по  $x$  уравнение (6), согласно [4] получим:

$$z'_x = \sum_{k=1}^{24} \varphi'_{kx}, \quad (8)$$

где: 
$$(\varphi_k)'_x = \sum_{j=1}^m (\varphi_k^j)'_x; \quad (9)$$

$$(\varphi_i^l)'_x = \begin{cases} -\frac{1}{2S} [(y_k - y_j)] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o; \end{cases}$$

$$(\varphi_j^l)'_x = \begin{cases} -\frac{1}{2S} [(y_i - y_k)] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o; \end{cases}$$

$$(\varphi_k^l)'_x = \begin{cases} -\frac{1}{2S} [(y_j - y_i)] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o. \end{cases}$$

Дифференцируя по  $y$  уравнение (6), получаем выражение:

$$z'_y = \sum_{k=1}^{24} C_k \varphi'_{ky};$$

$$\varphi'_{ky} = \sum_{j=1}^m \varphi'_{kj};$$

$$\varphi_{iy}^l = \begin{cases} \frac{1}{2S} [(y_k - y_i)] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o; \end{cases}$$

$$\varphi_{jy}^l = \begin{cases} \frac{1}{2S} [(y_i - y_k)] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o; \end{cases}$$

$$\varphi_{ky}^l = \begin{cases} \frac{1}{2S} [(y_j - y_i)] & \text{для } (x, y) \in l_o, \\ 0 & \text{для } (x, y) \in l_o. \end{cases}$$

Для нахождения значений коэффициентов  $C_k$ , которые бы обеспечивали функционалу экстремальное значение, продифференцируем выражение (8) по  $C_k$  и приравняем к нулю.

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_y}{\partial C_k} = & \int_0^{x_a} \int_0^{y_c} \frac{\partial (q_y + F_y)}{\partial C_k} dx dy + \\ & + \int_{x_a}^{x_p} \int_0^{y_p} \frac{\partial (q_y + F_y)}{\partial C_k} dx dy - \\ & - \int_{x_a}^{x_p} \int_0^{y_p} \frac{\partial (q_y + F_y)}{\partial C_k} dx dy = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $k = 1, 2, 3$ .

Производную  $\frac{\partial}{\partial C_k} (q_y + F_y)$  определим из уравнения:

$$\frac{\partial(q_y + F_y)}{\partial C_k} = b\rho v^2 \times \left\{ \begin{aligned} & -\frac{z_x'^3}{H(1+z_x'^2)} \frac{\partial z}{\partial C_i} + \\ & \left(1 - \frac{h}{H}\right) \frac{(3+z_x'^2)z_x'}{(1+z_x'^2)^2} \frac{\partial z_x'}{\partial C_i} + \\ & \left(1 - \frac{h}{H}\right) \end{aligned} \right\} \times \left\{ \begin{aligned} & \left[ (1+z_y'^2) \frac{\partial z_x'}{\partial C_i} - z_x'z_y' \frac{\partial z_y'}{\partial C_i} \right] \times \\ & \times (1+z_x'^2 + z_y'^2)^{\frac{3}{2}} - \\ & \frac{2 \cos \theta}{1+z_x'^2} \frac{\partial z_x'}{\partial C_i} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

при этом

$$\frac{\partial z}{\partial C_k} = \varphi_k, \quad \frac{\partial z_x}{\partial C_k} = \varphi_{kx}, \quad \frac{\partial z_y}{\partial C_k} = \varphi_{ky}. \quad (12)$$

Для решения системы уравнений (10) с помощью персонального компьютера используем вспомогательные таблицы (не приводим). После решения уравнения на персональном компьютере, получили значение высоты в каждой узловой точке. Эти данные также заносим в таблицу.

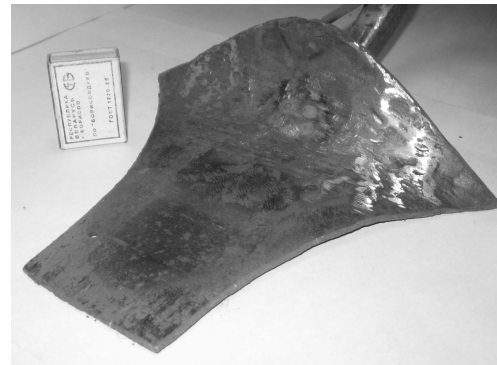
Используя метода прямого вариационного исчисления в теоретической части работы был обоснован профиль лемеха, обеспечивающий минимальное тяговое сопротивление. Полученный профиль представлен на рис. 4А.

С целью определения достоверности результатов теоретических исследований мы вычисляли энергетические показатели работы лемеха устройства для подрезания и подъема почвы. Для этого был изготовлен лемех с профилем, обоснованным теоретическим путём (рис. 4А), а для сравнения — с прямолинейным профилем (рис. 4Б, контрольный вариант).

Тяговые сопротивления лемехов определялись в почвенном канале с использованием персонального компьютера. Эксперимент проводился с четырехкратной повторностью.

Исследования лезвия лемеха по тяговому сопротивлению, с прямым и теоретически обоснованным профилем, проводились в почвенном канале при глубине обработки 0,12 м и влажности почвы 18%. Скорость движения тензометрической тележки составляла 0,69 м/с. Данные о тяговом сопротивлении лемеха с прямым (кон-

трольный вариант) и теоретически обоснованным профилями приведены в табл. 1.



А



Б

Рис. 4. Лемехи с теоретически обоснованным (А) и прямолинейным (Б) профилями

Результаты статистической обработки полученных экспериментальных данных с использованием критерия Фишера показывают, что доля влияния фактора составляет 91,8%, достоверны с вероятностью 95%. Наименьшая существенная разница составляет 22,626 Н.

Таблица 1. Тяговые сопротивления лемехов, Н

Повторность	Тип лемеха		% к контролю
	Контрольный	Экспериментальный	
1	125,0	89,25	
2	143,0	75,75	
3	152,0	89,25	
4	138,5	89,25	
Среднее	139,6	85,88	61,5

Анализ данных табл. 1 показывает, что лемех с теоретически обоснованным профилем по сравнению с лемехом прямого профиля имеет тяговое сопротивление на 61,5% меньше, что подтверждает достоверность результатов теоретических исследований.

**Выводы.** Обоснован профиль лемеха рабочего органа для подрезания и подачи почвы к рыхлительно-сепарирующему устройству минимальной энергоемкости с использованием метода прямого вариационного исчисления с заданным начальным углом вхождения в почву и конечным углом в точке прилегания его к стойке. Лемех с теоретически обоснованным профилем по сравнению с прямолинейным имеет меньшее тяговое сопротивление на 61,5%.

#### Литература

1. Евсюков Т.П. Результаты исследований процесса работы рыхлительно-сепарирующего устройства комбинированной машины / Т.П. Евсюков, В.Ф.Пащенко, М.И.Онишко // Совершенствование конструкций рабочих органов

сельскохозяйственной техники: сб. науч. тр. / Харьк. с.-х. ин-т им. В.В. Докучаева. — Харьков, 1988. — С. 11-16.

2. Комбинированная машина / [П.М. Василенко, В.В. Медведев, В.Ф. Пащенко и др.] / Госагропром СССР. ВНИИиТЭИ. Агропром. комплекс, № 4. — М., 1987.

3. Медведев В.В. Использование агрофизических свойств черноземов при разработке почвообрабатывающих машин / В.В. Медведев, П.И. Слободюк, В.Ф. Пащенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 1987. — № 3. — С. 6-8.

4. Василенко П.М. Применение методов вариационного исчисления к решению некоторых задач земледельческой механики / П.М. Василенко // Труды КСХИ. — Т. VI. — К., 1953.

#### Анотація

### Теоретичні дослідження технологічного процесу ґрунтообробної машини

В.Ф. Пащенко, В.В. Кім, А.А. Батулін

Розглядається комбіноване ґрунтообробне знаряддя, перед розпушувально-сепаруючим пристроєм якого передбачена установка лемешів. Функція лемешів — підрізування і подача ґрунту на розпушувально-сепаруючий пристрій. З метою мінімізації тягового опору знаряддя в цілому профіль лемешів обґрунтований із застосуванням методу прямого варіаційного обчислення. В якості початкових умов прийнято кут виходження лемешів у ґрунт і кінцевий кут в точці прилягання лемешів до стійки. Експериментально показано, що леміш із теоретично обґрунтованим профілем у порівнянні з прямолінійним лемешем має менший на 61,5% тяговий опір.

**Ключові слова:** ґрунт, леміш, профіль лемеша, взаємодія, тяговий опір, граничні умови, сепаруюча решітка, енергія.

#### Abstract

### Theoretical research of the process of tillage machines

V.F. Pashhenko, W.W. Kim, A.A. Batulin

We consider the combined tillage tool before ripping-separating device which accommodate plowshares. Function plowshares - trimming and filing of soil ripping-separating device. In order to minimize traction resistance tools in general profile plowshares justified using the method of direct variation calculus. As initial conditions made entry angle of the coulter into the ground and the final corner at the coulter to fit the rack. It was shown experimentally that share a theoretically sound profile compared to straight ploughshare is less by 61.5% tractive resistance.

**Key words:** soil, plowshares, profile plowshares, interaction, draft resistance, boundary conditions, Separating lattice energy.

Представлено: В.І. Пастухов/ Presented by: V.I. Pastukhov

Рецензент: С.І. Корнієнко / Reviewer: S.I. Kornienko

Подано до редакції / Received: 21.04.2015