

Универсализация лемешно-отвальной поверхности рабочего органа плуга

Universalization of plow-bottom surface of working organ of a plow

В. В. БЛЕДНЫХ¹, д-р техн. наукП. Г. СВЕЧНИКОВ¹, д-р техн. наукИ. П. ТРОЯНОВСКАЯ^{1, 2}, д-р техн. наук¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия, mail@csaa.ru² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, tripav63@mail.ruV. V. BLEDNYKH¹, DSc in EngineeringP. G. SVECHNIKOV¹, DSc in EngineeringI. P. TROYANOVSKAYA^{1, 2}, DSc in Engineering¹ South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia, mail@csaa.ru² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, tripav63@mail.ru

Для экономичной обработки почвы при разных скоростях и грунтовых фонах требуются рабочие органы с разными параметрами. Использование плугов с оптимальными параметрами лемешно-отвальной поверхности позволит минимизировать затраты на обработку почвы без снижения ее качества. Рассматриваются такие параметры рабочих поверхностей плуга, как углы установки лемеха, загиб отвала и другие. Регулировка положения рабочего органа плуга путем поворота и смещения позволит получить наиболее рациональный тип лемешно-отвальной поверхности и обеспечит лучшее качество обработки почвенного пласта с использованием одного рабочего органа на различных грунтах и скоростях. Предложен новый способ сравнения топологии двух лемешно-отвальных поверхностей с использованием критериальной фильтр-функции, а также оригинальные методы ввода данных о топологии лемешно-отвальных поверхностей и их аппроксимации полиномиальными зависимостями для сглаживания и обеспечения унимодальности целевой функции оптимизации при использовании метода Хука—Дживса. Получены оптимальные углы поворота рабочих органов плуга (в пределах 12 градусов), при которых отклонения лемешно-отвальной поверхности сравнения и базовой минимальны. Согласно агротехническим и технологическим требованиям по перекрытию ширины захвата рабочих органов между собой, первый рабочий орган плуга закрепляется без смещения, второй в зависимости от реализуемой скорости должен иметь смещение на 70 мм, третий — на 140 мм, четвертый — на 210 мм. Приведены практические результаты использования разработанного способа универсализации лемешно-отвальной поверхности.

Ключевые слова: универсализация; лемешно-отвальная поверхность; пространственный поворот; топология; совмещение нормалей; агротехнические требования.

Economical cultivation of different soils on different speeds requires working organs with different parameters. Using plows with optimal parameters of plow-bottom surface will allow to minimize the cost of tillage with no loss in quality. Such parameters of working surfaces as setting angles of plowshare, bend of mouldboard and others are considered. Adjustment of working organ of a plow by rotating and off-setting will provide the most useful type of plow-bottom surface and better quality of tillage with the use of a single working organ for different soils and speeds. The paper presents a newly developed way to compare the topology of two plow-bottom surfaces with the use of criterial filter-function, as well as original methods to input the data on the topology of plow-bottom surfaces and to approximate these data by polynomial dependencies for smoothing and providing the unimodality of objective function of optimization when using the Hooke and Jeeves method. The optimal angles of rotation (12 degrees) are obtained whereby the deviations of a comparison plow-bottom surface and a basic one are minimal. According to the agrotechnical and technological requirements on the overlap of operating widths between the working organs, the first working organ of plow should be attached without offset, the second one depending on the realized speed should have an offset of 70 mm, the third — of 140 mm, the fourth — of 210 mm. The practical results of using the developed method for universalization of plow-bottom surface are presented.

Keywords: universalization; plow-bottom surface; spatial turn; topology; alignment of normal lines; agrotechnical requirements.

Введение

Трактор способен совершать работу только в составе агрегата, при этом его техническая производительность во многом определяется параметрами рабочих органов. Для экономичной обработки почвы на различных физико-механическом составе грунтовых фонах и при работе на разных скоростях требуются рабочие органы с разными параметрами. Использование плугов с оптимальными параметрами лемешно-отвальной поверхности (ЛОП) позволит минимизировать затраты на обработку почвы без снижения качества работы.

Рассматриваемые параметры рабочих поверхностей плуга: углы установки лемеха ко дну и стенке борозды, загиб отвала (определяемый разницей между максимальным и минимальным углами направления движения рабочего органа, верхней и нижней образующими отвала) и др.

При классической схеме оборота прямоугольное сечение пласта обрабатываемой почвы вращается поочередно около граней пласта. При этом рабочий орган движется с поступательной скоростью. Поэтому пространственная траектория каждой точки пласта почвы представляет собой винтовую линию с некоторым шагом. Если шаг винтовой линии одинаков для каждой точки сечения пласта, то получим винтовую поверхность вращения. При переменном шаге получаемые поверхности называют полувинтовыми или культурными.

Шаг S винтовых линий и законы его изменения определяются агротехническими требованиями к обороту пласта b и скорости V_0 движения плуга [1—4].

Оптимальная форма ЛОП плуга зависит от скорости V_0 его движения. Например, для поверхности культурного типа зависимость шага S ЛОП плуга имеет вид:

$$S = S_0 + \frac{b}{\operatorname{tg} \mu},$$

где S_0 — начальный шаг винтовой линии ($S_0 = \frac{2}{3}\pi V_0 \sqrt{\frac{b_0}{g}}$); V_0 — рабочая скорость поступательного движения плуга; b_0 — ширина захвата корпуса плуга; g — ускорение свободного падения; b — радиус вращения почвенного пласта; μ — угол наклона поперечного сечения пласта по ходу движения корпуса.

Для ЛОП полувинтового типа закон изменения шага [4, 5]:

$$S = \frac{2\pi V_0}{\sqrt{zg}} b.$$

С увеличением скорости V_0 возрастает значение шага S , что приводит к уменьшению углов наклона горизонтальных образующих к стенке борозды, что сказывается на качестве вспашки [1—3].

Цель исследования

Регулировка положения рабочего органа плуга дает возможность получить наиболее рациональный тип ЛОП для обеспечения наилучшего качества обработки почвенного пласта, а также использовать один рабочий орган для различных типов грунтов и рабочих скоростей.

В связи с этим основная задача исследования — разработка универсального рабочего органа плуга для работы на различных скоростях и типах почв с использованием одной и той же ЛОП путем ее пространственного поворота и смещения.

Теоретические исследования

Для универсализации ЛОП плуга определим такие перемещения, которые необходимо применить для ЛОП, спроектированной для работы на скорости V_1 , чтобы максимально приблизить ее к ЛОП, предназначенной для работы на скорости V_2 . Для этого разработан следующий алгоритм поворота (рис. 1):

- 1) обе ЛОП (базовая и сравнения) аппроксимируются методом наименьших квадратов набором плоскостей;
- 2) определяются нормали к этим плоскостям;
- 3) нормали совмещаются путем выполнения ряда последовательных поворотов базовой поверхности:

- поворот вокруг оси z на угол ψ (новую систему координат обозначим как $x'y'z'$) [7, 8];
- поворот относительно оси x' на угол θ (новую систему координат обозначим как $x''y''z''$);
- поворот относительно оси z'' на угол φ .

Матрица преобразования координат имеет вид [3]:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos\varphi\cos\psi - \sin\varphi\cos\theta\sin\psi; \\ m_{12} &= \cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\cos\theta\cos\psi; \\ m_{13} &= \sin\varphi\sin\theta; \\ m_{21} &= -\sin\varphi\cos\psi - \cos\varphi\cos\theta\sin\psi; \\ m_{22} &= -\sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\theta\cos\psi; \end{aligned}$$

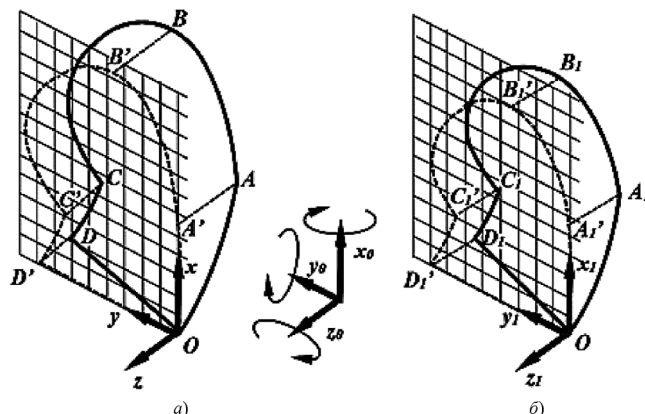


Рис. 1. Повороты и смещения ЛОП сравнения:

a — базовая ЛОП; b — ЛОП сравнения

$$m_{23} = \cos\varphi\sin\theta;$$

$$m_{31} = \sin\theta\sin\psi;$$

$$m_{32} = -\sin\theta\cos\psi;$$

$$m_{33} = \cos\theta.$$

После окончательного поворота ЛОП находим координаты точек новой поверхности:

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{Bmatrix} = [M] \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix},$$

где x, y, z — координаты точек базовой ЛОП в исходной системе координат; x_1, y_1, z_1 — координаты ЛОП сравнения после серии последовательных поворотов.

Полученная поверхность будет максимально приближена к требуемой ЛОП для работы со скоростью V_2 .

Для решения задачи оптимизации положения ЛОП сравнения по отношению к базовой ЛОП выбран метод координатного спуска Хука—Дживса, обладающий рядом достоинств:

- не нужно вычислять градиент целевой функции;
- сама функция может быть задана любым способом;
- удобство реализации на ЭВМ [7, 9].

На основе выбранного метода проведены численные расчеты, позволившие получить необходимые углы поворота и смещения вдоль трех осей. Для каждого типа ЛОП определены оптимальные углы между стенкой борозды и лемехом рабочего органа:

- 36° для скоростной;
- 40° для полувинтовой (винтовая ЛОП представляет собой ее разновидность);
- 44° для культурной;
- 48° для цилиндрической.

Таким образом, для работы на различных технологических скоростях движения агрегата поворот рабочих органов должен производиться в пределах угла 12°. Величина боковых перемещений a , соответствующая этому углу, составляет 70 мм. Согласно агротехническим и технологическим требованиям по перекрытию ширины захвата рабочих органов между собой, первый рабочий орган плуга закрепляется без какого-либо смещения,

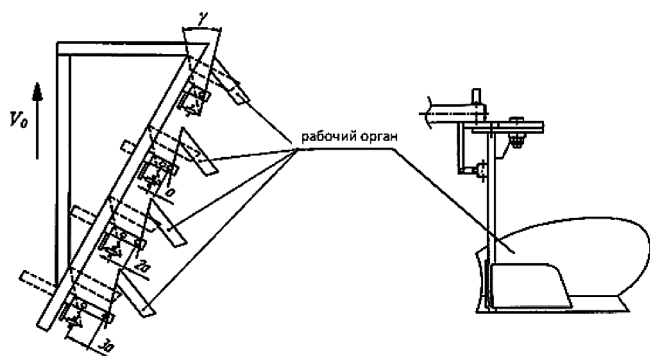


Рис. 2. Настройка универсального плуга на заданные режимы работы (повороты ЛОП)

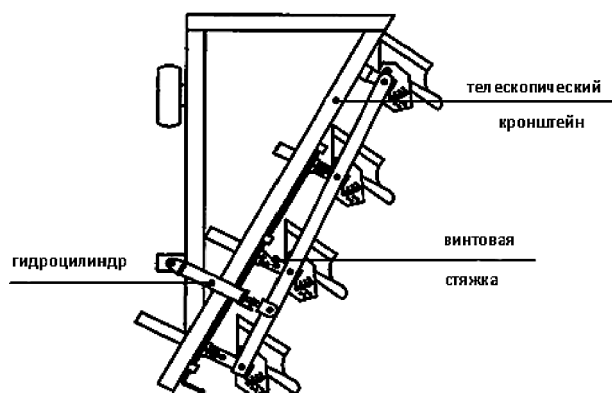


Рис. 3. Плуг с механизмом регулирования ЛОП

второй в зависимости от реализуемой скорости должен иметь смещение на величину a , третий — $2a$, четвертый — $3a$ (рис. 2). Изменение угла установки рабочего органа к стенке борозды позволяет получить наиболее рациональный тип ЛОП.

Практическая реализация

Для осуществления способа определения и регулирования параметров ЛОП рабочего органа плуга для работы на различных типах почв и скоростях движения агрегата предложен целый ряд технических решений, новизна которых защищена патентами РФ [10–12, 14]. Суть способа заключается в регулировании углов, характеризующих ЛОП.

Вначале с помощью компьютера определяют значение угла установки лемеха плуга к стенке борозды и величину его бокового перемещения в зависимости от скорости движения агрегата. Для этого параметры базовой ЛОП, предназначенной для работы на первой заданной скорости движения тракторного агрегата, и параметры ЛОП, предназначенной для работы на второй заданной скорости, заносят с помощью программы в компьютер. Далее графически строят обе ЛОП, аппроксимируют их плоскостями и определяют нормали к последним.

Затем, совмещая полученные нормали, определяют числовое значение угла установки рабочего органа к стенке борозды и величину его бокового перемещения, на которое необходимо повернуть и переместить базовую

ЛОП в соответствии с заданной скоростью движения и агротехническими и технологическими требованиями по перекрытию ширины захвата рабочих органов между собой. Полученные параметры ЛОП устанавливают, регулируя базовую ЛОП рабочих органов плуга путем последовательных поворотов и перемещений.

Регулирование угла установки рабочего органа к стенке борозды на универсальном плуге осуществляется с помощью системы управления, состоящей из гидроцилиндра и телескопического кронштейна для соединения рабочего органа и несущего бруса (рис. 3).

Телескопические кронштейны представляют собой трубы квадратного сечения с зазором между трубами 1–2 мм. Один конец кронштейна жестко закреплен на верхней плите плуга, другой имеет возможность свободного перемещения с последующей фиксацией. Количество фиксирующих отверстий на телескопических квадратных трубах верхней и нижней плит соответствует четырем стандартным углам установки рабочего органа к стенке борозды для четырех ЛОП: цилиндрической, культурной, полувинтовой и винтовой.

Поворот рабочего органа осуществляется с помощью винтовой стяжки, шарнирно соединенной со стойкой рабочего органа. Все рабочие органы плуга соединены между собой рычагом, установленным на осях телескопических кронштейнов с зазором и возможностью вращения относительно оси первого рабочего органа, закрепленного без возможности бокового перемещения.

Отвалный плуг с изменяемыми параметрами ЛОП регулируется в зависимости от почвенно-климатических условий, которые могут изменяться в больших пределах за довольно короткое время. Регулирование параметров ЛОП включает задание необходимых углов установки рабочего органа к стенке борозды.

По разработанному чертежу на заводе "Станкомаш" изготовлены опытные образцы ЛОП, которые прошли натурные испытания в учебном хозяйстве ЧИМЭСХ. Результаты испытаний свидетельствуют о работоспособности предложенного метода перемещения ЛОП в пространстве [15].

Заключение

Предложенный способ универсализации ЛОП путем пространственного поворота для работы на различных типах почв и скоростях движения агрегата заключается в следующем [16]:

- 1) имеющаяся базовая поверхность, предназначенная для работы на скорости V_1 , аппроксимируется некоторыми плоскостями, и определяются нормали к плоскостям;
- 2) поверхность, предназначенная для работы на другой скорости V_2 , меньшей или большей, может быть либо задана экспериментально, либо получена расчетным путем; она также аппроксимируется некоторыми плоскостями, определяются нормали к плоскостям;
- 3) полученные нормали совмещаются путем последовательных поворотов нормалей базовой поверхности вокруг осей z и x , и определяются углы, на которые нужно повернуть базовую ЛОП, чтобы ее пространственные параметры стали максимально близки к искомой поверхности;

4) контроль качества совпадения поверхностей осуществляется сравнением координат точек этих поверхностей;

5) полученные параметры пространственного поворота и перемещения ЛОП выставляются на реальном плуге при помощи соответствующих механизмов.

Литература и источники

1. Blednykh V., Svechnikov P. Theoretical foundations of tillage. Tillers and aggregates. New York: Nova Science Publ. Inc., 2014, 174 p.
2. Blednykh V., Svechnikov P. Economic reasons of tillage quality // *European science review*, 2014, no. 7—8, pp. 103—105.
3. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Troyanovskaya I. P. Analytical model of soil pulverization and tillage tools // *Procedia Engineering*, 2015, no. 129, pp. 69—74. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.010.
4. Blednykh V., Svechnikov P. Theory of a tillage wedge and its applications. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH, 2013, 94 p.
5. Бледных В. В. Кинематика отвальной вспашки. Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов // *Труды ЧИМЭСХ*, 1983. С. 9—17.
6. Бледных В. В. Совершенствование рабочих органов почвообрабатывающих машин на основе математического моделирования технологических процессов: Дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1989. 230 с.
7. Заляпин В. И. Методы оптимизации. Челябинск: Челябинский ГУ, 1993. 101 с.
8. Мантуров О. В., Матвеев Н. М. Курс высшей математики. М.: Высшая школа, 1986. 480 с.
9. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции: Монография / Пер. с англ. под ред. Н. В. Баничука. М.: Мир, 1983. 478 с.
10. Бледных В. В., Свечников П. Г. Использование одной лемешно-отвальной поверхности для работы на разных скоростях // *Вестник ЧГАА*. 2013, т. 63. С. 9—16.
11. Бледных В. В., Свечников П. Г., Граков Ф. Н. и др. Способ определения и регулирования параметров лемешно-отвальной поверхности рабочего органа плуга для работы на различных скоростях движения агрегата и устройство для регулирования параметров лемешно-отвальной поверхности рабочего органа плуга. Патент РФ № 2528042, 2014.
12. Бледных В. В., Свечников П. Г., Граков Ф. Н. Способ определения и регулирования параметров лемешно-отвальной поверхности рабочего органа плуга для получения заданной степени крошения почвы при отвальной обработке и устройство для их регулирования на рабочем органе плуга. Патент РФ № 2535864, 2014.
13. Бледных В. В., Граков Ф. Н., Нечаев П. С. и др. Отвальный плуг с регулировкой лемешно-отвальной поверхности рабочих органов. Патент РФ № 2462013, 2012.
14. Бледных В. В., Рахимов Р. С., Свечников П. Г. и др. Рабочий орган отвального плуга с регулируемыми параметрами лемешно-отвальной поверхности. Патент РФ № 2488258, 2013.
15. Бледных В. В., Свечников П. Г., Рахимов Р. С. и др. Плуг с регулируемыми параметрами лемешно-отвальной поверхности рабочих органов. Патент РФ № 2470503, 2012.
16. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Troyanovskaya I. P. Moldboard surface universalization of the ploughshare operating unit // *Procedia Engineering*, 2016, no. 150, pp. 1297—1302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.297.

References

1. Blednykh V., Svechnikov P. *Theoretical foundations of tillage. Tillers and aggregates*. New York, Nova Science Publ. Inc., 2014, 174 p.

2. Blednykh V., Svechnikov P. Economic reasons of tillage quality. *European science review*, 2014, no. 7—8, pp. 103—105.

3. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Troyanovskaya I. P. Analytical model of soil pulverization and tillage tools. *Procedia Engineering*, 2015, no. 129, pp. 69—74. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.010.

4. Blednykh V., Svechnikov P. *Theory of a tillage wedge and its applications*. Berlin, Logos Verlag Berlin GmbH, 2013, 94 p.

5. Blednykh V. V. Kinematics of mouldboard plowing. Tillage machines and the dynamics of units. *Trudy ChIMESKh*, 1983, pp. 9—17 (in Russ.).

6. Blednykh V. V. *Sovershenstvovanie rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin na osnove matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov* [Improving the working organs of tillers on the basis of mathematical modeling of technological processes]. DSc in Engineering thesis. Leningrad, 1989, 230 p.

7. Zalyapin V. I. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Chelyabinsk, Chelyabinsk State University Publ., 1993, 101 p.

8. Manturov O. V., Matveev N. M. *Kurs vysshey matematiki* [Course of higher mathematics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986, 480 p.

9. Haug E. J., Arora J. S. *Applied optimal design: mechanical and structural systems*. John Wiley & Sons Inc., 1979, 520 p. (Russ. ed.: Khog E., Arora Ya. *Prikladnoe optimal'noe proektirovanie. Mekhanicheskie sistemy i konstruksii*. Moscow, Mir Publ., 1983, 478 p.)

10. Blednykh V. V., Svechnikov P. G. Using a single plow-bottom surface for operation at different speeds. *Vestnik ChGAA*, 2013, vol. 63, pp. 9—16 (in Russ.).

11. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Grakov F. N., Roybu M. Yu. *Sposob opredeleniya i regulirovaniya parametrov lemeshno-otval'noy poverkhnosti rabochego organa pluga dlya raboty na razlichnykh skorostyakh dvizheniya agregata i ustroystvo dlya regulirovaniya parametrov lemeshno-otval'noy poverkhnosti rabochego organa pluga* [Method for determining and adjusting the parameters of plow-bottom surface of working organ of a plow to operate at different speeds of unit movement, and a device for adjusting the parameters of plow-bottom surface of working organ of a plow]. RF patent no. 2528042, 2014.

12. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Grakov F. N. *Sposob opredeleniya i regulirovaniya parametrov lemeshno-otval'noy poverkhnosti rabochego organa pluga dlya polucheniya zadannoy stepeni krosheniya pochvy pri otval'noy obrabotke i ustroystvo dlya ikh regulirovaniya na rabochem organe pluga* [Method for determining and adjusting the parameters of plow-bottom surface of working organ of a plow to obtain the desired degree of soil pulverization during mouldboard tillage, and a device for their regulation on working organ of a plow]. RF patent no. 2535864, 2014.

13. Blednykh V. V., Grakov F. N., Nechaev P. S., Rakhimov R. S., Svechnikov P. G., Svechnikov A. P. *Otval'nyy plug s regulirovkoj lemeshno-otval'noy poverkhnosti rabochikh organov* [Mouldboard plow with adjustable plow-bottom surface of working organs]. RF patent no. 2462013, 2012.

14. Blednykh V. V., Rakhimov R. S., Svechnikov P. G., Shiryayeva E. A. *Rabochiy organ otval'nogo pluga s reguliruemymi parametrami lemeshno-otval'noy poverkhnosti* [Working organ of a mouldboard plow with adjustable parameters of plow-bottom surface]. RF patent no. 2488258, 2013.

15. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Rakhimov R. S., Zaynishev A. V., Abramovskikh I. Yu., Svechnikov A. P., Achimov Yu. A. *Plug s reguliruemymi parametrami lemeshno-otval'noy poverkhnosti rabochikh organov* [Plow with adjustable parameters of plow-bottom surface of working organs]. RF patent no. 2470503, 2012.

16. Blednykh V. V., Svechnikov P. G., Troyanovskaya I. P. Moldboard surface universalization of the ploughshare operating unit. *Procedia Engineering*, 2016, no. 150, pp. 1297—1302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.297.