

## Оптимальный профиль передней поверхности чизельного рабочего органа

**Яков Петрович Лобачевский**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, первый заместитель директора, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация, e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

**Сергей Иванович Старовойтов**, кандидат технических наук, доцент, Брянский Государственный аграрный университет, с. Кокино, Выгоничский район, Брянская область, Российская Федерация, e-mail: starovoitov.si@mail.ru

Культиваторы для ухода за парами и пропашными культурами снабжаются рабочими органами различных типов, в том числе чизельными долотообразными. К основным конструктивным параметрам долотообразного рыхлительного рабочего органа относят вылет носка, радиус кривизны передней поверхности, угол между касательной к носку и дном борозды. Передняя поверхность составлена из двух участков. Первый участок имеет форму логарифмической спирали, второй представлен прямой линией. Угол между касательной к носку и дном борозды зависит от угла внутреннего трения и находится в интервале 35-40 градусов. Обосновали, что радиус кривизны, определяющий боковую форму долотообразной лапы, в основном зависит от величины внутреннего угла трения деформируемой почвы. (*Цель исследования*) Получить аналитическую зависимость профиля передней поверхности чизельного рабочего органа, позволяющей работать на почвах с различным гранулометрическим составом. (*Материалы и методы*) Предположили, что условие устойчивого скольжения почвенного пласта с различным гранулометрическим составом по поверхности долотообразной рыхлительной лапы выполнимо, если произведение проекций касательных реакций элементарной площадки поверхности на проекции участка траектории движения меньше нуля. Установили, что проекция касательного усилия элементарной площадки поверхности зависит от коэффициента соответствия угла поворота величине заглубления, величины заглубления элементарной площадки, от коэффициента внешнего трения почвы и первой производной функции кривой поверхности. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что коэффициент кривой квадратичной параболы, описывающей поверхность долотообразной лапы, определяется с учетом ее плавности и непрерывности при изменении текущего значения вертикальной координаты профиля боковой поверхности долотообразной лапы при фиксированных значениях вылета носка и глубины хода. Определили, что боковой профиль проектируемой долотообразной лапы не зависит от свойств почвы. При этом величина начального угла соответствует требованию, при котором деформации не распространяются ниже носка, а элементарные реакции пересекают дневную поверхность поля. (*Выводы*) Выявили, что угол подъема поверхности бокового профиля рыхлительной лапы составляет 26 градусов 50 минут. Получили, что криволинейная поверхность долотообразной лапы описывается квадратичной параболой, а коэффициент кривой параболы, описывающей профиль поверхности долотообразной лапы, будучи отрицательным, равен отношению вылета лапы к удвоенному параметру глубины хода.

**Ключевые слова:** почвообработка, почвообрабатывающий чизельный рабочий орган, долотообразная лапа, конструктивные параметры, профиль поверхности.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Оптимальный профиль передней поверхности чизельного рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №2. С. 26-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-2-26-30

## Optimum Profile of Chisel Front Surface

**Yakov P. Lobachevskiy**, Dr. Sc. (Eng.), corr. member of RAS, first deputy director, Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, Moscow, Russian Federation, e-mail: vim@vim.ru;

**Sergey I. Starovoytov**, Ph. D. (Eng.), associate professor, Bryansk State Agrarian University, vil. Kokino, Vygonichi district, Bryansk region, Russian Federation, e-mail: starovoitov.si@mail.ru

Cultivators for fallow and intertilled crops cultivation have several types of chisel. The key design data of a chisel are a tip overhang, radius of curvature of the front surface, an angle between a tangent to the tip and the furrow bottom. The radius of curvature of the front surface consists of two parts. The first one is in the form of a logarithmic spiral, the another is as a straight line. The angle between the tangent to the top and the furrow bottom depends on the angle of internal friction. It is in an interval of 35-40 degrees. The curvature radius and a lateral form of chisel generally depend on the size of an internal angle of friction of the deformable soil. (*Purpose of research*) To obtain an analytical dependence of the front surface



profile of the chisel working body, which allows to work on soils with different granulometric composition and angle of internal friction. (*Materials and methods*) The authors assumed that the condition of steady sliding of soil layer with various aggregate-size distribution on the chisel surface is feasible if the product of the projections of the tangential reactions of the elemental area of the surface and projections of the movement trajectory is less than zero. The projection of the tangential reactions of the elemental area of the surface depends on the concordance of the rotation angle to the size of digging-in, also on the deepening of the elementary area, the coefficient of external friction of the soil, and the first derivative of the function curve of the surface. The curve coefficient of a quadratic parabola outlining the surface of a chisel was estimated considering its smoothness and continuity. (*Results and discussion*) At the same time the current value of vertical coordinate of chisel lateral surface changed when the fixed values of tip overhang and running depth. The lateral profile of the as-designed chisel does not depend on soil characteristics. The size of the initial angle corresponds to the requirement that the deformation does not extend below the tip, and elementary reactions cross the surface of the field. (*Summary*) The angle of grade of the lateral profile surface of the chisel makes 26 degrees and 50 minutes. The curved surface of the wedge-shaped mouldboard is described by the function square parabola. The coefficient of the curve parabola describing a profile of a chisel surface, being negative, is equal to ratio of chisel overhang to the doubled parameter of the running depth.

**Keywords:** Soil cultivation; Soil-cultivating working tool; Chisel; Design requirements.

**For citation:** Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I. Optimum profile of chisel front surface. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018; Vol. 12; 2: 26-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-1-26-30

**К**ультивацией называют поверхностную обработку почвы для ухода за парами и пропашными культурами. Рыхлительные рабочие органы обеспечивают создание необходимых условий для посева и ухода за полевыми культурами [1-4].

Различают оборотные, копьевидные, долотообразные рабочие органы. К основным конструктивным параметрам долотообразной рыхлительной лапы относят вылет носка, радиус кривизны передней поверхности, угол между касательной к носку и дном борозды (угол подъема). Рыхлительные лапы предназначены для рыхления почвы на глубину до 25 см [5, 6]. Критическая глубина резания долотообразной лапы определяется по формуле [7, 8]:

$$h_{кр} = \frac{b \left[ 0,1 \frac{\sigma_c}{\sigma_p} (1 + 3tg\psi) \right] - 2,5}{4,2 + ctg\alpha}, \quad (1)$$

где  $b$  – ширина долотообразной лапы, м;

$\sigma_c$  – предел прочности почвы на сжатие, Па;

$\sigma_p$  – предел прочности почвы на растяжение, Па;

$\psi$  – угол скалывания почвы, рад;

$\alpha$  – угол подъема, град.

По данным Зеленина А.Н., при углах подъема  $\alpha = 25^\circ - 45^\circ$  критическая глубина резания

$$h_{кр} = (2,5...4)b. \quad (2)$$

Радиус кривизны определяет боковую форму рыхлителя. Ее выбор может быть осуществлен теоретическим или экспериментальными методами. Основой теоретических методов служат предположения Березанцева В.Г., где рассчитываются величины пассивного давления на подпорные стенки в условиях предельного равновесия среды [9].

Экспериментальные методы базируются на возможности построения линий скольжения. Линия скольжения перед рабочим органом ограничивает блок по-

чвы, участвовавший в деформации одного цикла. Значительный интерес представляет собой метод Одэ. Он предполагает, что линия скольжения состоит из двух участков: первый имеет форму логарифмической спирали, второй представляет собой прямую линию. В итоге поверхность бокового профиля имеет очертания логарифмической спирали с углом подъема:

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\varphi_{внут}}{2}, \quad (3)$$

где  $\varphi_{внут}$  – величина внутреннего угла трения, град.

Данная величина начального угла способствует тому, что деформации не распространяются ниже носка, элементарные реакции пересекают дневную поверхность поля, что способствует наилучшему качеству крошения [4].

Вылет носка лапы:

$$L = h_{кр} \left( tg \Theta_H + \frac{\cos \varphi_{внут}}{e^{\Theta_H \times tg \varphi_{внут}} e^{\Theta_H} \cos \Theta_H} \right), \quad (4)$$

где  $\Theta_H$  – величина текущего полярного угла нижней кромки профиля, град.;

$\Theta_v$  – величина полярного угла для определения верхней кромки бокового профиля рабочего органа, град.

Величину текущего полярного угла нижней кромки бокового профиля определяют по формуле:

$$\Theta_H = \frac{3}{2} \varphi_{внут} - 45^\circ. \quad (5)$$

Величина полярного угла для определения верхней кромки бокового профиля рабочего органа равна:

$$\Theta_v = 90^\circ - \varphi_{внут}. \quad (6)$$

Таким образом, радиус кривизны, определяющий боковую форму долотообразной лапы, в основном зависит от величины внутреннего угла трения деформируемой почвы. А для практических целей важно то обстоятельство, что долотообразная лапа должна работать на почвах, отличающихся

по гранулометрическому составу и, соответственно, величине внутреннего угла трения [10].

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ** – получение аналитической зависимости профиля передней поверхности доло-тообразной лапы, позволяющей работать на почвах с различным гранулометрическим составом и, соответственно, углом внутреннего трения.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Известно выражение для определения работы при внедрении рабочего органа чизельного культиватора [11]:

$$A = \sigma \int_0^{x_0} dx \int_{h(x)}^H \varphi(x; h) dh, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение на поверхности кривой рабочего органа, Н/м;

$x_0$  – горизонтальная координата исследуемой кривой, м;

$H$  – максимальная величина заглабления, м;

$h(x)$  – глубина, при которой элементарная площадка кривой рабочего органа вступит в контакт с почвой, м.

Функция  $\varphi$  равна:

$$\varphi(x; h) = dN_x dl_x + dN_y dl_y + dT_x dl_x + dT_y dl_y, \quad (8)$$

где  $dN_x$ ,  $dN_y$  – проекции нормальных усилий элементарной площадки кривой рабочего органа на оси координат, Н;

$dT_x$ ,  $dT_y$  – проекции касательных усилий элементарной площадки кривой рабочего органа на оси координат, Н;

$dl_x$ ,  $dl_y$  – проекции участка траектории движения площадки кривой рабочего органа на оси координат, м.

Коэффициент квадратичной параболы, описывающей профиль передней поверхности доло-тообразной лапы, должен обеспечивать устойчивое скольжение почвенного пласта от режущей кромки к вершине. Это будет в случае, если векторы  $d\vec{T}$  и  $d\vec{l}$  в любой точке поверхности рабочего органа и при любом заглаблении составляют между собой тупой угол. При этом соблюдается следующее условие:

$$dTdl < 0, \quad (9)$$

или же в развернутой форме:

$$dT_x dl_x + dT_y dl_y < 0. \quad (10)$$

Начальные условия для пассивных рабочих органов следующие: рабочий орган заглабился в почву полностью –  $h(x) = 0$ ; поворот при его заглаблении отсутствует –  $k = 0$ ; вдоль траектории заглабления рабочий орган не перемещается –  $a(h) = const$ ;  $a'(h) = 0$ .

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Рассмотрим выражение (10) с учетом представленных выше начальных условий. Проекция касательного усилия элементарной площадки кривой рабочего органа на ось  $x$  равна:

$$dT_x = f_{внеш} [\cos(kh) - f'(x) \sin(kh)], \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент соответствия угла поворота величине заглабления, рад/м;

$h$  – величина заглабления элементарной площадки кривой поверхности, м;

$f_{внеш}$  – коэффициент внешнего трения почвы;

$f'(x)$  – первая производная функции кривой поверхности. Следовательно:

$$dT_x = f_{внеш} [\cos(0 \cdot h) - f'(x) \sin(0 \cdot h)];$$

$$dT_x = f_{внеш} \cdot f'(x).$$

Проекция касательного усилия элементарной площадки кривой рабочего органа на ось  $y$ :

$$dT_y = f_{внеш} [\sin(kh) + f'(x) \cos(kh)];$$

$$dT_y = f_{внеш} [\sin(0 \cdot h) + f'(x) \cos(0 \cdot h)]; \quad (12)$$

$$dT_y = f_{внеш} \cdot f'(x).$$

Проекция участка траектории движения площадки кривой рабочего органа на ось  $x$ :

$$dl_x = [-k(x \sin(kh) + f(x) \cos(kh)) + a'(h)], \quad (13)$$

где  $a'(h)$  – первая производная функции кривой заглабления:

$$dl_x = [0 \cdot (x \sin(0 \cdot h) + 0 \cdot \cos(0 \cdot h)) + 0];$$

$$dl_x = 0.$$

Проекция участка траектории движения площадки кривой рабочего органа на ось  $y$ :

$$dl_y = [k(\cos(kh) - f(x) \sin(kh)) - 1];$$

$$dl_y = [0 \cdot (x \cos(0 \cdot h) - 0 \cdot \sin(0 \cdot h)) - 1]; \quad (14)$$

$$dl_y = -1.$$

Таким образом, реализация условия (10) имеет следующий вид:

$$f_{внеш} \cdot f'(x) = 0.$$

Функция  $y = f(x)$  представлена следующим выражением:

$$y = a_1 x^2 - a_1 x_0 x + \frac{y_0}{x_0} x, \quad (15)$$

где  $a_1$  – коэффициент кривой параболы, описывающей профиль поверхности доло-тообразной лапы;

$x$  – вертикальная координата профиля боковой поверхности доло-тообразной лапы;

$x_0$  – величина заглабления лапы;

$y_0$  – вылет носка лапы.

Выбор представления функции квадратичной параболой возможен, так как и в теории устойчивости стержневых систем условие Лагранжа – Дирихле описывает форму стержня квадратичной параболой [12].

Тогда первая производная выражения (15) имеет вид:

$$f'(x) = 2a_1 x - a_1 x_0 + \frac{y_0}{x_0}.$$

Следовательно,



Table Таблица										
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРА $y$ ПРИ РАЗНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ $x$ И $a_1$ TO DETERMINATION OF PARAMETER $y$ AT DIFFERENT VALUES $x$ AND $a_1$										
$x$	Коэффициент $a_1$ , Coefficient $a_1$									
	-51,25	-25,63	-17,08	-12,81	-10,25	-8,54	-7,32	-6,41	-5,69	-5,13
0°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,11	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
0,02	0,21	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
0,03	0,29	0,16	0,12	0,10	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
0,04	0,37	0,21	0,15	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07
0,05	0,44	0,24	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09
0,06	0,49	0,28	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10
0,07	0,54	0,30	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12
0,08	0,57	0,33	0,25	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13
0,09	0,60	0,35	0,26	0,22	0,19	0,18	0,16	0,16	0,15	0,14
0,10	0,62	0,36	0,27	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15
0,11	0,62	0,37	0,28	0,24	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
0,12	0,62	0,37	0,29	0,25	0,22	0,20	0,19	0,18	0,18	0,17
0,13	0,60	0,37	0,29	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18
0,14	0,57	0,36	0,29	0,25	0,23	0,22	0,20	0,20	0,19	0,19
0,15	0,54	0,35	0,28	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19
0,16	0,49	0,33	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20
0,17	0,44	0,30	0,26	0,24	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20
0,18	0,37	0,28	0,25	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20
0,19	0,29	0,24	0,23	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20
0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21

$$f_{\text{внеш}} \left( 2a_1x - a_1x_0 + \frac{y_0}{x_0} \right) = 0.$$

Коэффициент внешнего трения по определению не равен нулю, поэтому нулевое значение будет иметь выражение в скобках:

$$2a_1x - a_1x_0 + \frac{y_0}{x_0} = 0.$$

Преобразуем полученное выражение:

$$a_1(2x - x_0) + \frac{y_0}{x_0} = 0.$$

Искомый коэффициент равен:

$$a_1 = -\frac{y_0}{x_0(2x - x_0)}. \tag{16}$$

Параметр  $x_0$  соответствует величине заглубления долотообразной лапы, параметр  $y_0$  – вылету носка (рисунк). В качестве примера принимаем  $x_0 = 0,2$  м;  $y_0 = 0,2$  м.

Для определения значения  $a_1$  зададим параметр  $x$  в интервале  $0 \leq x \leq x_0$  с шагом 0,01.

Предпочтение отдаем отрицательному значению  $a_1$ .

На рисунке представлена геометрия боковой поверхности долотообразной рыхлительной лапы с учетом  $a_1 = -5,13$ ;  $x_0 = 0,2$  м;  $y_0 = 0,21$  м.

В последующих столбцах таблицы представлены расчетные значения параметра  $y$  по выраже-

нию (15) при отрицательной величине  $a_1$ .

Выполнению условия плавности и непрерывности  $y \leq y_0$  соответствует значение  $a_1 = -5,13$ . Данное значение может быть получено по формуле:

$$a_1 = -\frac{y_0}{x_0^2}. \tag{17}$$

Угол подъема  $\alpha$  составляет  $26^\circ 50'$ . Величина соответствует предъявляемым условиям.

**Выводы**

1. Боковой профиль разработанного долотообразного чизельного рабочего органа оптимален для обработки почвы различного гранулометрического состава.

2. Величина начального угла соответствует требованию, при котором деформации не распространяются ниже носка, а элементарные реакции пересекают дневную поверхность поля.

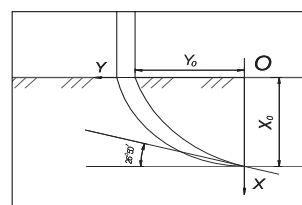


Рис. Боковой профиль проектируемой долотообразной лапы  
Fig. Lateral profile of the as-designed chisel

3. Криволинейная поверхность долотообразного рабочего органа описывается функцией:  $y = a_1x^2 - a_1xx_0 + (y_0/x_0)x$ , а коэффициент кривой пара-

болы, описывающей профиль его передней поверхности  $a_1$ , будучи отрицательным, равен отношению вылета лапы  $y_0$  к удвоенному параметру глубины хода  $x_0$ .

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sacun V., Lobachevskii Ya. Langfristige trends in der entwicklung von bodenbearbeitungsgeraten. In: Agrartechnische Berichte. Reports on the section «Agriculture Machinery». 1993: 76-82.
2. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Физические аспекты суглинистой почвы: Монография. Брянск: Брянский ГАУ, 2015. 90 с.
3. Резников Л.А., Ещенко В.Т., Дьяченко Г.Н., Сокол Н.А. Основы проектирования и расчет сельскохозяйственных машин. М.: Агропромиздат, 1991. 102 с.
4. Лобачевский Я.П. Современные почвообрабатывающие технологии. М.: МГАУ, 1999. 40 с.
5. Турбин Б.Г., Лурье А.Б., Григорьев С.М., Иванович Э.М., Мельников С.В. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчет. Ленинград: Машиностроение, 1967. 92 с.
6. Ксеневиц И.П., Варламов Г.П., Колчин Н.Н. и др. Машиностроение. Энциклопедия. Сельскохозяйственные машины и оборудование. Т. IV. М.: Машиностроение, 1998. 157 с.
7. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Теоретические и технологические аспекты работы рыхлительного рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N5. С. 17-23.

8. Shmulevich I., Asaf Z. Rubinstein D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil & Tillage Research*. 2007; 97: 37-50.
9. Бауков А.В., Кушнарев А.С. Использование методов механики сплошных сред при проектировании рыхлительных рабочих органов культиваторов // *Вопросы механизации сельского хозяйства*. Т. XVII. Мелитополь: Мелитопольский НИИСХ, 1971. 17 с.
10. Izmailov A., Liskin I., Lobachevskii Ya., Sidorov S., Khoroshenkov V., Mironova A., Luzhnova E. Simulation of soil-cutting blade wear in an artificial abrasive environment based on the similarity theory. *Russian Agricultural Sciences*. 2017. Vol. 43. N1. 71-74.
11. Старовойтов С.И. Исследование процесса и разработка чизельного культиватора для работы в плодово-ягодных насаждениях: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: ВТИИСП, 1994. 82 с.
12. Ibrahmi A., Bentaher H., Hbaieb M., Maalej A., Mouazen A.M. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015; 117: 258-267.

### REFERENCES

1. Sacun V., Lobachevskii Ya. Langfristige trends in der entwicklung von bodenbearbeitungsgeraten. In: Agrartechnische Berichte. Reports on the section «Agriculture Machinery». 1993: 76-82. (In German).
2. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I. Fizicheskie aspekty suglinistoy pochvy: Monografiya [Physical aspects of the loamy soil: Monograph]. Bryansk: Bryanskiy GAU, 2015: 90. (In Russian).
3. Reznikov L.A., Eshchenko V.T., D'yachenko G.N., Sokol N.A. Osnovy proektirovaniya i raschet sel'skokhozyaystvennykh mashin [Principles of design and calculation of agricultural machinery]. M.: Agropromizdat, 1991: 102. (In Russian).
4. Lobachevskiy Ya.P. Sovremennyye pochvoobrabatyvayushchie tekhnologii [Modern soil-cultivating technologies]. M.: MGAU, 1999: 39. (In Russian).
5. Turbin B.G., Lur'e A.B., Grigor'ev S.M., Ivanovich E.M., Mel'nikov S.V. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny. Teoriya i tekhnologicheskyy raschet [Agricultural machinery. Theory and process design]. Leningrad: Mashinostroenie, 1967: 92. (In Russian).
6. Ksenevich I.P., Varlamov G.P., Kolchin N.N. i dr. Mashinostroenie. Entsiklopediya. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i oborudovanie [Machine Engineering. Encyclopedia. Agricultural machinery and equipment]. Vol. IV. M.: Mashinostroenie, 1998: 157. (In Russian).
7. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I. Theoretical and techno-

- logical aspects of ripper working tool operation. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016; 5: 17-23. (In Russian).
8. Shmulevich I., Asaf Z. Rubinstein D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil & Tillage Research*. 2007; 97: 37-50. (In English).
9. Baukov A.V., Kushnarev A.S. Using methods of continuum mechanics in the design of cultivating working bodies of the mouldboards. *Voprosy mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva*. T. XVII. Melitopol': Melitopol'skiy NIISKh, 1971: 17. (In Russian).
10. Izmailov A., Liskin I., Lobachevskii Ya., Sidorov S., Khoroshenkov V., Mironova A., Luzhnova E. Simulation of soil-cutting blade wear in an artificial abrasive environment based on the similarity theory. *Russian Agricultural Sciences*. 2017. Vol. 43; 1: 71-74. (In Russian).
11. Starovoytov S.I. Issledovanie protsessa i razrabotka chizel'nogo kul'tivatora dlya raboty v plodovo-yagodnykh nasazhdeniyakh [Research of process and development of chisel cultivator for operation in fruit and berry plantations]: Diss. ... kand. tekhn. nauk. Moscow: VTIISP, 1994: 82. (In Russian).
12. Ibrahmi A., Bentaher H., Hbaieb M., Maalej A., Mouazen A.M. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015; 117: 258-267. (In English).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.