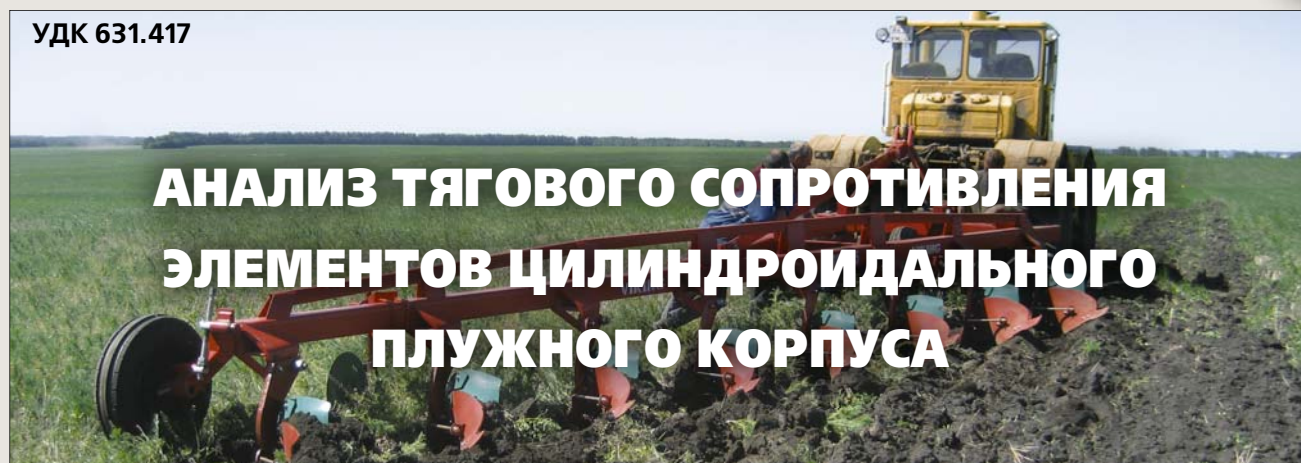


УДК 631.417



АНАЛИЗ ТЯГОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИЛИНДРОИДАЛЬНОГО ПЛУЖНОГО КОРПУСА

ЛОБАЧЕВСКИЙ Я.П.¹, КОМОГОРЦЕВ В.Ф.², СТАРОВОЙТОВ С.И.², ХРАМОВСКИХ К.А.²,
 докт. техн. наук, канд. физ.-мат. наук, канд. техн. наук, инженер
 профессор, доцент,

¹Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация, e-mail: vim@vim.ru,

²Брянский государственный аграрный университет, ул. Советская, 2а, с. Кокино, Выгоничский район, Брянская обл. 243365, Российская Федерация, e-mail: starovoitov.si@mail.ru

Одним из направлений снижения энергоемкости процесса обработки почвы является изменение формы и параметров элементов плужного корпуса – лемеха и отвала. Проанализировали известные математические выражения для определения тягового сопротивления плугов. Установлено, что они не позволяют учитывать различную степень нагруженности отдельных участков отвала. Предложена методика определения горизонтальной составляющей сопротивления отвала, учитывающая эту разницу в нагруженности поверхности плужного корпуса. Составляющую сопротивления поверхности определили суммированием сопротивлений элементарных горизонтальных составляющих отвала, используя кривые крошения продольно-вертикальной проекции плужного корпуса. Отметили, что эти кривые проекции формируются вследствие горизонтального переноса точек пересечения секущих плоскостей, параллельных стенке борозды. Выявили, что если деформатор полностью заглублен в почву, но отсутствуют его поворот и перемещение, то выражение для определения величины работы при внедрении в почву активного рабочего органа позволяет рассчитать тяговое усилие элементарной горизонтальной составляющей сопротивления отвала. Показали, что полученное выражение можно использовать при аппроксимации кривых продольно-вертикальной проекции плужного корпуса, где наиболее нагружены грудь и срединная часть отвала. Определили, что степень нагруженности элементарной горизонтальной составляющей отвала формируется величиной нормального напряжения, которая сопоставима с коэффициентом деформации. Составляющая сопротивления на отбрасывание пласта учитывает глубину вспашки, ширину захвата плужного корпуса, скорость пахотного агрегата, плотность деформируемой почвы, среднее значение угла наклона образующих поверхности отвала к стенке борозды. Показали, что при абсолютной влажности суглинистой почвы около 21 процента, глубине вспашки 0,20 метра тяговое сопротивление отвала плужного корпуса шириной захвата 0,35 метра составит 1035 Н.

Ключевые слова: сопротивление почвы, отвал, плужный корпус, почвенный пласт, коэффициент деформации.

Обработка почвы остается самой энергоемкой операций в производстве сельхозкультур [1-3]. Одно из направлений снижения энергоемкости – это изменение формы и параметров элементов плужного корпуса: лемеха и отвала [4].

Известны выражения В.П. Горячкина, Н.В. Щучкина, Г.Н. Синеокова, В.В. Кацыгина для опреде-

ления тягового сопротивления плугов. Размеры плужного корпуса отражены в параметрах деформируемого почвенного пласта. Значимы также выражения А.Т. Вагина, которые дифференцируют тяговое сопротивление лемеха и отвала. Так, тяговое усилие, затрачиваемое на перемещение пласта по отвалу, равно:

$$P_o = P_{\text{под}} + P_{\text{ц}} + P_{\text{спи}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{под}}$ – усилие на подъем пласта, Н;
 $P_{\text{ц}}$ – усилие от действия центробежной силы, Н;
 $P_{\text{спи}}$ – составляющая сил сопротивления пласта изгибу при его обороте, Н.

Составляющей сил сопротивления пласта изгибу при его обороте для старопакотных минеральных земель можно пренебречь. Усилие, затрачиваемое на подъем пласта, определяем по формуле:

$$P_{\text{под}} = G \cdot (\sin \alpha_{\text{пол}} + f_{\text{внеш}} \cdot \cos \delta_{\text{ср}}) \cdot \cos \alpha_{\text{пол}} + \cos \theta', \quad (2)$$

где G – вес пласта на лемешно-отвальной поверхности, Н;

$\alpha_{\text{пол}}$ – угол наклона полевого обреза лемеха ко дну борозды, град.;

$\delta_{\text{ср}}$ – среднее значение угла наклона отвала ко дну борозды в ортогональном сечении, град.;

θ' – угол отклонения пласта на лемехе от продольно-вертикальной плоскости в горизонтальной проекции, град.;

$f_{\text{внеш}}$ – коэффициент внешнего трения почвы.

Вес пласта почвы на лемешно-отвальной поверхности равен:

$$G = \eta_n \frac{\gamma_{\text{поч}} \cdot h_n \cdot b^2}{2 \tan \gamma},$$

где $\gamma_{\text{поч}}$ – удельный вес почвы, Н/м³;

h_n – толщина пласта на лемешно-отвальной поверхности, м;

b – ширина захвата плужного корпуса, м;

γ – угол, образованный лезвием лемеха со стенкой борозды, град.;

η_n – коэффициент, учитывающий увеличение веса пласта по сравнению с плоским клином.

Для определения среднего значения угла наклона отвала ко дну борозды используется выражение:

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\frac{\pi}{2} + \alpha}{2}, \quad (3)$$

где α – угол наклона лемеха ко дну борозды в ортогональном сечении, град.

Угол отклонения пласта на лемехе от продольно-вертикальной плоскости в горизонтальной проекции равен:

$$\theta' = \arctg \left[\frac{1 - \cos \left(\frac{\frac{\pi}{2} + \alpha}{2} \right) \tan \gamma}{1 + \tan^2 \gamma \cos \left(\frac{\frac{\pi}{2} + \alpha}{2} \right)} \right]. \quad (4)$$

Составляющую от действия центробежной силы определим по выражению:

$$P_{\text{ц}} = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot 2,5 \rho_0} \left[\sin \left(\frac{\frac{\pi}{2} + \alpha}{2} \right) \cdot \sin \theta_{\text{ср}} + f \cdot \cos \alpha_{\text{пол}} \cdot \cos \theta' \right], \quad (5)$$

где ρ_0 – радиус кривизны поверхности плуга в ортогональном сечении, м;

$\theta_{\text{ср}}$ – среднее значение угла наклона образующей отвала к стенке борозды, град.;

v – скорость движения плуга, м/с.

Среднее значение угла наклона образующей к стенке борозды:

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{\theta_{\text{max}} + \theta_{\text{min}}}{2},$$

где θ_{max} , θ_{min} – максимальный и минимальный углы наклона образующей отвала к стенке борозды, град.

Геометрические характеристики отвала представлены шириной захвата плужного корпуса, средним значением угла наклона отвала ко дну борозды, радиусом кривизны поверхности в ортогональном сечении, средним значением угла наклона образующей отвала к стенке борозды, но на наш взгляд, более полно представить его пространственную конфигурацию и учесть различную величину давления можно только с помощью кривых крошения продольно-вертикальной проекции.

Цель исследования – разработка методики определения горизонтальной составляющей сопротивления отвала, которая учитывает особенности его пространственной конфигурации и различную величину давления на его поверхности с помощью кривых крошения продольно-вертикальной проекции плужного корпуса.

Материалы и методы. Горизонтальная составляющая сопротивления отвала плужного корпуса равна:

$$R_x = R_{\text{пов}} + R_{\text{отб}}, \quad (6)$$

где $R_{\text{пов}}$ – составляющая сопротивления поверхности отвала, Н;

$R_{\text{отб}}$ – составляющая сопротивления на отбрасывание пласта, Н.

Горизонтальную составляющую сопротивления отвала плужного корпуса можно определить с помощью выражения:

$$R_{\text{пов}} = \sum_{i=1}^n R_{xi}, \quad (7)$$

где $R_{xi} = \frac{A_i}{\Delta}$ – элементарная горизонтальная составляющая сопротивления отвала плужного корпуса, Н (здесь A_i – величина работы, Дж; Δ – единичное перемещение рабочего органа, м).

Величину работы найдем с помощью выражения, позволяющего обосновать геометрию перед-

ней поверхности активного рабочего органа [5-7]:

$$A = \sigma \int_0^{x_0} dx \int_{h(x)}^H \varphi(x; h) dh, \quad (8)$$

где σ – нормальное напряжение на поверхности, Н/м.

Использование выражения (8) возможно при следующих начальных условиях: деформатор заглублен в почву полностью (h – величина заглубления деформатора); поворот при заглублении отсутствует: $k=0$ (k – коэффициент, учитывающий угол поворота деформатора от величины заглубления); перемещение вдоль траектории заглубления $\alpha(h)=const$, то есть $\alpha'(h)=0$. Рассмотрим составляющие функции $\varphi(x; h)$ выражения (8). Определим проекции касательного усилия элементарной площадки на оси x и y , а подставив соответствующие значения k и h , получим выражения:

$$dT x_*' = f_{внеш} \cdot [\cos(k \cdot h) - f'(x) \cdot \sin(k \cdot h)];$$

то есть $dT x_*' = f_{внеш} \cdot$

$$dT y_*' = f_{внеш} \cdot [\sin(k \cdot h) + f'(x) \cdot \cos(k \cdot h)];$$

$$\text{то есть } dT y_*' = f_{внеш} \cdot f'(x), \quad (9)$$

где $f'(x)$ – производная функции, описывающей геометрию поверхности деформатора.

Проекция нормального усилия элементарной площадки на оси x и y вычислим по формулам:

$$dN x_*' = -[\sin(k \cdot h) + f'(x) \cdot \cos(k \cdot h)],$$

то есть $dN x_*' = -f'(x)$;

$$dN y_*' = -[\cos(k \cdot h) - f'(x) \cdot \sin(k \cdot h)],$$

то есть $dN y_*' = -1$. (10)

Соответственно, проекции траекторий движения элементарной площадки на ось x и ось y можно записать как:

$$dl x_*' = -k(x \cdot \sin(k \cdot h) + f(x) \cdot \cos(k \cdot h)) + a'(h),$$

$$dl y_*' = k \cdot (x \cdot \cos(k \cdot h) - f(x) \cdot \sin(k \cdot h)) - 1. \quad (11)$$

После соответствующих подстановок получим:

$$dl x_*' = 0 \text{ и } dl y_*' = -1$$

где x – горизонтальная координата произвольной точки поверхности деформатора;

$a'(h)$ – первая производная функции, описывающей траекторию заглубления носка деформатора.

Функцию $\varphi(x; h)$ в уравнении (8) запишем в виде:

$$\varphi(x; h) = f_{внеш} \cdot 0 + f_{внеш} \cdot f'(x) \cdot (-1) + (-f'(x) \cdot 0) + 1 \cdot (-1) = 0,$$

Тогда выражение работы A примет вид:

$$A = -\sigma \int_0^{x_0} dx \int_0^H (f_{внеш} \cdot f'(x) + 1) dh.$$

Если в рамках указанных условий принять $\varphi(x; h) = -(f_{внеш} \cdot f'(x) + 1)$, а функцию $f(x)$ заменить на $f(x) = a_1 x^2 + b_1 x$, где a_1, b_1 – искомые параметры кри-

вой, то работу можно записать в виде:

$$A = -\sigma \cdot H \cdot [f_{внеш} \cdot (a_1 x_0^2 + b_1 x_0) + x_0], \quad (12)$$

где x_0 – задаваемая горизонтальная координата верхнего обреза отвала, а коэффициент $b_1 = \frac{y_0}{x_0} - a_1 \cdot x_0$, (здесь y_0 – задаваемая вертикальная координата верхнего обреза отвала).

Величина работы (Н·м), определяемая выражением (12), отрицательна. Параметр σ имеет размерность Н/м. Окончательное выражение работы при задаваемой ширине рабочего органа b выглядит так:

$$A = -\sigma \cdot H \cdot b \cdot [f_{внеш} \cdot (a_1 x_0^2 + b_1 x_0) + x_0].$$

Для определения искомых параметров кривых a_1 и b_1 воспользуемся горизонтальной и продольно-вертикальной проекциями цилиндрической лемешно-отвальной поверхности (рисунк). Для этого необходимо на горизонтальной проекции параллельно стенке борозды провести секущие плоскости. Точки пересечения секущих плоскостей и точки (6-11) образующей горизонтальной проекции следует перенести горизонтальным переносом на поле продольно-вертикальной проекции. Характерные точки от каждой секущей плоскости надо соединить плавной кривой. Анализ данных кривых показывает, что интенсивное нарастание угла крошения характерно для образующих, исходящих от места стыка лемеха и отвала. С учетом этого работой зоны крыла отвала можно пренебречь.

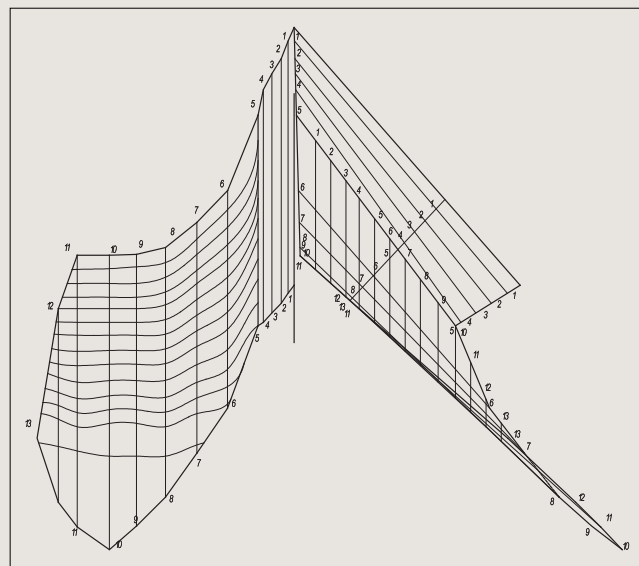


Рис. Горизонтальная и продольно-вертикальная проекция цилиндрической лемешно-отвальной поверхности

В таблице представлены значения a_1, b_1 и x_0 кривых секущих плоскостей продольно-вертикаль-

ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРИВЫХ СЕКУЩИХ ПЛОСКОСТЕЙ										
Показатели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a_1	-0,004	-0,004	-0,004	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,002	-0,002
b_1	1,84	1,75	1,88	1,58	1,46	1,38	1,31	1,26	1,12	1,02
x_0	0,30	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34

поверхности отвала к стенке борозды, рад.

Для определения сопротивления на отбрасывание пласта используем следующие значения: $a = 0,20$ м, $b = 0,35$ м, $v = 1,98$ м/с, $\rho = 1554$ кг/м³, $\gamma_{cp} = 48,5^\circ$.

ной плоскости лемешно-отвальной поверхности.

Почвенный пласт, который уже частично разрушился после прохождения лемеха, на отвале испытывает сложные виды нагружения.

С учетом этого величину нормального давления целесообразно представить коэффициентом деформации.

Условия проведения испытаний следующие: гранулометрический состав – суглинок [8], фон – стерня зерновых, абсолютная влажность почвы – 20,73%, твердость – 3,3 МПа, скорость движения пахотного агрегата – 7,14 км/ч. При этих условиях величина коэффициента деформации составила 45190 Н [9]. С учетом полученного расчетного значения коэффициента сопротивления деформации обрабатываемая суглинистая почва относится к категории «средних» по трудности обработки.

Составляющая сопротивления на отбрасывание пласта равна:

$$R_{отб} = a \cdot b \cdot v^2 \cdot \rho \cdot \sin\left(\frac{\gamma_{cp}}{2}\right) \cdot \cos \gamma_{cp},$$

где a – глубина вспашки, м;

b – ширина захвата плужного корпуса, м;

v – скорость пахотного агрегата, м/с;

ρ – плотность почвы, кг/м³;

γ_{cp} – среднее значение угла наклона образующих

При абсолютной влажности суглинистой почвы 20,73% составляющая тягового усилия поверхности отвала равна $R_{пов} = 920$ Н; составляющая тягового усилия на отбрасывание пласта $R_{отб} = 115$ Н; горизонтальная составляющая тягового усилия отвала плужного корпуса $R_x = 1035$ Н.

Выводы

1. Разработана методика определения горизонтальной составляющей тягового сопротивления отвала плужного корпуса, учитывающая особенности его пространственной конфигурации с помощью кривых крошения продольно-вертикальной проекции.

2. Почва как объект обработки описывается коэффициентом деформации и углом внешнего трения почвы, которые зависят от величины абсолютной влажности почвы.

3. При абсолютной влажности суглинистой почвы около 21%, глубине вспашки 0,20 м тяговое сопротивление отвала плужного корпуса шириной захвата 0,35 м составит 1035 Н.

Таким образом, экспериментальные данные по величине нормального давления на поверхности отвала позволят в полной мере учитывать его пространственную конфигурацию при определении горизонтальной составляющей сопротивления на отбрасывание почвы.

Литература

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2013. – № 4. – С. 8-12.
2. Лобачевский Я.П. Современные почвообрабатывающие технологии. – М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 1999. – 39 с.
3. Лобачевский Я.П. Новые почвообрабатывающие технологии и технические средства // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 2000. – № 8. – С. 30-32.
4. Лобачевский Я.П., Панов А.И., Панов И.М. Перспективные направления совершенствования конструкций лемешно-отвальных плугов // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2000. – № 5. – С. 12-18.
5. Старовойтов С.И. Исследование процесса и разработка чизельного культиватора для работы

в плодово-ягодных насаждениях: Дисс. канд. техн. наук. – М.: ВТИИСП, 1994. – С. 82.

6. Старовойтов С.И., Комогорцев В.Ф., Старовойтов С.И. Обоснование передней поверхности рабочего органа чизельного культиватора // *Достижения науки и передовой опыт в производстве и учебно-воспитательный процесс*: Матер. X межвуз. науч.-практ. конф. – Брянск: Брянская ГСХА, 1997. – С. 37.

7. Пат. 78626 РФ. Рабочий орган почвообрабатывающей машины // Ларионов М.А., Педай Н.П., Поляков А.Г., Игошин Н.Н., Сизов О.А., Лобачевский Я.П., Заикин В.А. // *Бюл.* 2008. № 34.

8. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. Энергетическая и качественная оценка рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2015. – № 5. – С. 10-13.

9. Старовойтов С.И., Старовойтова Н.П., Чемисов Н.Н. Коэффициент сопротивления дефор-

мации // Актуальные вопросы эксплуатации современных систем энергообеспечения и природо-

пользования. Матер. IX междунар. науч.-техн. конф. – Брянск: Брянский ГАУ, 2015. – С. 249.

ANALYSIS OF TRACTIVE RESISTANCE OF GENERAL PLOW BODY ELEMENTS

Ya.P. Lobachevskiy¹, V.F. Komogortsev², S.I. Starovoytov², K.A. Khramovskikh²

¹All-Russia Research Institute of Mechanization for Agriculture, 1st Institutskiy proezd, Moscow, 109428, Russian Federation, e-mail: vim@vim.ru,

²Bryansk State Agrarian University, Sovetskaya St., 2a, vil. Kokino, Vygonichi district, Bryansk region, 142660, Russian Federation, e-mail: starovoytov.si@mail.ru.

One of the directions of decrease in power consumption of soil cultivation is change of a form and parameters of elements of a plow body like a plough share and a moldboard. Known mathematical expressions for determination of traction resistance of plows do not allow to consider various degree of loading of different parts of moldboard. The offered technique of definition of a horizontal component of traction resistance of a moldboard considers this difference in loading of a plow body surface. The component of surface resistance was determined due to summation of resistances of elementary horizontal components of a moldboard, with use of crumbling curves of a longitudinally vertical projection of the plow body. These curves are formed owing to horizontal transfer of points of intersection of secants of cutting planes parallel to a furrow wall. If the deformer is completely digged in the soil, but there is no its turn and movement, then an expression for determination of work intensity of the active working element at penetration to the soil allows to calculate traction effort of an elementary horizontal component of moldboard resistance. The received expression can be used at approximation of curves of a longitudinally vertical projection of the plow body where the breast and median part of a moldboard are most loaded. Degree of loading of an elementary horizontal component of a moldboard is formed by the normal tension value which is comparable to deformation coefficient. The resistance component for soil layer ejecting considers the plowing depth, furrow width, speed of the plowing unit, density of the deformable soil, average value of a tilt angle of generators of a moldboard surface to a furrow wall. If moisture content in loamy soil is about 21 percent, plowing depth equals 0.20 m then the traction resistance of a 0.35 m wide moldboard will amount 1035 N.

Keywords: Soil resistance; Moldboard; Plow body; Soil layer; Deformation coefficient.

References

1. Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P., Sizov O. A. *Perspektivnye puti primeneniya energo- i ekologicheskikh effektivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv* [Long-term ways of use of energy and environmentally efficient machine technologies and techniques], *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2013. No. 4. pp. 8-11 (Russian).
2. Lobachevskiy Ya. P. *Sovremennye pochvoobrabatyvayushchie tekhnologii* [Modern soil-cultivating technologies]. Moscow: MGAU, 1999. 39 pp. (Russian).
3. Lobachevskiy Ya. P. *Novye pochvoobrabatyvayushchie tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva* [New soil-cultivating technologies and technical means]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2000. No. 8. pp. 30-32 (Russian).
4. Lobachevskiy Ya. P., Panov A. I., Panov I. M. *Perspektivnye napravleniya sovershenstvovaniya konstruktivnykh lemeshno-otval'nykh plugov* [Perspective directions of improvement of moldboard share ploughs design]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2000. No. 5. pp. 12-18 (Russian).
5. Starovoytov S. I. *Issledovanie protsessov 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: VTISP, 1994. pp. 82 (Russian).

6. Starovoytov S. I., Komogortsev V. F., Starovoytov S. I. *Obosnovanie peredney poverkhnosti rabochego organa chizel'nogo kul'tivatora* [Justification of a forward surface of working element of chisel cultivator]. *Dostizheniya nauki i peredovoy opyt v proizvodstvo i uchebno-vospitatel'nyy protsess*: Mater. X mezhvuz. nauch.-prakt. konf. Bryansk: Bryanskaya GSKhA, 1997. pp. 37 (Russian).
7. Patent 78626 RF. *Rabochiy organ pochvoobrabatyvayushchey mashiny* [Working tool of soil-cultivating machine]. Larionov M. A., Peday N. P., Polyakov A. G., Igoshin N. N., Sizov O. A., Lobachevskiy Ya. P., Zaikin V. A. *Byul.* 2008. No 34 (Russian).
8. Lobachevskiy Ya. P., Starovoytov S. I., Chemisov N. N. *Energeticheskaya i kachestvennaya otsenka rabochego organa* [Power and technological evaluation of soil cultivating working tool]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. No. 5. pp. 10-13 (Russian).
9. Starovoytov S. I., Starovoytova N. P., Chemisov N. N. *Koeffitsient soprotivleniya deformatsii* [Deformation resistance coefficient]. *Aktual'nye voprosy ekspluatatsii sovremennykh sistem energoobespecheniya i prirodopol'zovaniya*. Mater. IX mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Bryansk: Bryanskiy GAU, 2015. pp. 249 (Russian).