



Обоснование конструктивной схемы плуга для снижения энергозатрат основной обработки почвы

Федор Николаевич Граков¹,
кандидат технических наук, доцент кафедры;
Александр Владимирович Гриценко^{1, 2},
доктор технических наук, профессор кафедры,
e-mail: alexgrits13@mail.ru;

Вадим Анатольевич Алябьев²,
кандидат технических наук, доцент кафедры

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Российская Федерация;

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Российская Федерация

Реферат. Колебание тягового сопротивления лемешно-отвального плуга при смене условий работы можно уменьшить, усовершенствовав конструктивную схему орудия. (*Цель исследования*) Снизить или исключить изменения тягового сопротивления плуга при помощи автоматических регуляторов глубины вспашки, что позволит уменьшить энергозатраты агрегата и, следовательно, повысить его производительность. (*Материалы и методы*) Рассмотрели две группы лемешно-отвальных плугов, отличающихся способом соединения рамы с осью подвеса трактора. Изучили их достоинства и недостатки. Для определения рациональных конструктивных параметров плуга оценили влияние взаимного расположения рабочих органов (корпусов) на тяговое сопротивление и глубину обработки почвы, а также на изменение формы и поперечной площади почвенного пласта. (*Результаты и обсуждение*) Представили расчетные зависимости, по которым видно, что при увеличении угла постановки рабочего органа в поперечной плоскости происходит скачок тягового сопротивления, зависящий от величины перекрытия рабочих органов. Выявили зависимость тягового сопротивления от положения оси вращения плуга: чем меньше величина отклонения положения плуга от оси вращения, тем интенсивнее падает тяговое сопротивление. Проанализировали три схемы плугов на почве с удельным сопротивлением 0,8 килограмма на сантиметр квадратный и выбрали предпочтительную. Определили, что изменение тягового сопротивления на единицу изменения средней глубины вспашки составляет для плуга первой схемы 146 килограммов на сантиметр, для второй – 128, для третьей – 210 килограммов на сантиметр. (*Выводы*) Выявили, что наилучшая конструктивная схема – у полунавесного плуга, имеющего шарнирное соединение с трактором в поперечной плоскости и опорные колеса, установленные на поверхности поля. На испытаниях плуг с данной схемой показал высокую технологическую надежность, существенное увеличение производительности (при силовом регулировании до 10-11 процентов) без ухудшения условий труда тракториста и агротехнических показателей.

Ключевые слова: почвообработка, конструктивная схема, лемешно-отвальный плуг, тяговое сопротивление, почвенный пласт.

Для цитирования: Граков Ф.Н., Гриценко А.В., Алябьев В.А. Обоснование конструктивной схемы плуга для снижения энергозатрат основной обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 15-20. DOI 10.22314.2073-7599-2019-13-5-15-20.

Determining the Structural Design of a Plow to Reduce Energy Costs of Basic Soil Tillage

Fedor N. Grakov¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor of the department;
Aleksandr V. Gritsenko^{1, 2},
Dr.Sc.(Eng.), professor of the department,
e-mail: alexgrits13@mail.ru;

Vadim A. Alyab'ev²,
Ph.D.(Eng.), associate professor of the department

¹South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russian Federation;

²South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract. Sharp fluctuation in the traction resistance of a moldboard plow arising when changing working conditions can be decreased by improving the plow design. (*Research purpose*) To reduce or eliminate changes in the traction resistance of a plow using automatic tillage depth regulators, which will reduce the energy consumption of the unit and, therefore, increase its productivity. (*Materials and methods*) The authors considered two different groups of moldboard plows differing in the type of the frame fastening to the tractor suspension axis, and examined their advantages and disadvantages. To determine the rational design parameters of a plow, they estimated the influence of the relative position of working bodies on the traction resistance and tillage depth, as well as on the change in the shape and transverse area of a soil layer. (*Results and discussion*) The paper presents the established relationships, which show that when the angle of a working body is set in the transverse plane upward, there is a jump in traction resistance depending on the overlap amount of the working bodies. The study has revealed the relationship between traction resistance and the position of the plow rotation axis: the less the plow deviates from its rotation axis, the more intensively traction resistance decreases. Three structural designs of plows used on the soil with a resistivity of 0.8 kilograms per square centimeter have been analyzed and the most appropriate design has been chosen. It was determined that the change in traction resistance per unit of change in the average depth of plowing for the first plow scheme 146 kilograms per centimeter, for the second – 128, for the third – 210 kilograms per centimeter. (*Conclusions*) It has been revealed that the best structural design is that of a semi-mounted plow having a hinge-joint connection with a tractor in the transverse plane and support wheels resting on the field surface. Plows with this structural design have shown high technological reliability in tests, as well as a significant increase in productivity (with draft control of up to 10-11 percent) without deteriorating the working conditions of a tractor driver and field performance indicators.

Keywords: soil tillage, structural design, moldboard plow, traction resistance, soil layer.

For citation: Grakov F.N., Gritsenko A.V., Alyab'ev V.A. Obosnovanie konstruktivnoy skhemy pluga dlya snizheniya energozatrat osnovnoy obrabotki pochvy [Determining the structural design of a plow to reduce energy costs of basic soil tillage]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 15-20 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-15-20.

В цикле операций по производству продукции растениеводства наиболее энергозатратной считается вспашка [1, 2]. При выполнении этой операции тяговое сопротивление почвообрабатывающего орудия даже в пределах одного прохода машинно-тракторного агрегата (МТА) колеблется в широких пределах [1, 3]. Как правило, это приводит либо к перегрузке трактора (в этом случае механизатор должен переходить на низшую передачу движения), либо к его недогрузке [4, 5]. Кардинальное снижение или исключение изменений тягового сопротивления плуга позволит существенно снизить энергозатраты пахотного агрегата и, следовательно, повысить его производительность [6, 7]. Стабилизация тягового сопротивления плуга в динамике может осуществляться автоматическими регуляторами, исполнительным механизмом которых служит гидронавесной механизм трактора [8, 9]. В этом случае регулирование тягового сопротивления происходит путем изменения глубины обработки почвы [10, 11].

Цель исследования – определить рациональные конструктивные параметры плуга, чтобы снизить или исключить изменения тягового сопротивления плуга при помощи автоматических регуляторов глубины вспашки, что позволит уменьшить энергозатраты агрегата и, следовательно, повысить его производительность.

Материалы и методы. Конструктивные схемы лемешно-отвальных плугов по способу соединения рамы с осью подвеса можно разделить на две принци-

пиально различные группы. Первая группа имеет жесткое соединение рамы плуга с осью подвеса в поперечно-вертикальной плоскости, вторая – шарнирное соединение рамы с осью подвеса в этой же плоскости (*рис. 1*).

Плуги обеих групп имеют определенные достоинства и недостатки.

Основное достоинство плугов, относящихся к первой группе, – возможность значительно снизить тяговое сопротивление [12]. При автоматическом регулировании технологического процесса вспашки происходит догружение колес трактора в результате исключения передних опорных колес плуга и переноса части веса плуга на трактор.

Недостаток состоит в том, что для изменения средней глубины хода плуга на какую-то величину необходимо глубину вспашки первого корпуса изменить на величину, в 2 раза большую, то есть колебание глубины передних корпусов достигает недопустимых значений. Для устранения этого недостатка необходимо для задних корпусов применять второй контур регулирования.

Достоинство плугов второй группы – одновременное изменение глубины вспашки всеми корпусами при изменении высоты оси подвеса (при корректной компоновке опор носки всех лемехов поднимаются на одинаковую величину). Но главное с точки зрения автоматического регулирования достоинство таких плугов заключается в возможности регулирования тягового сопротивления путем изменения не только глу-

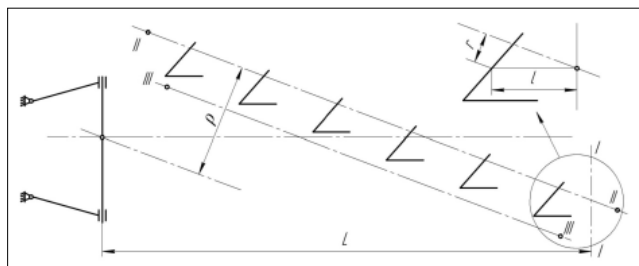


Рис. 1. Схемы полунавесных плугов:

I-I – ось вращения плуга во время изменения положения оси подвеса по высоте при жестком соединении плуга с трактором в поперечной плоскости; II-II – ось вращения плуга во время изменения положения оси подвеса по высоте при шарнирном соединении плуга с трактором в поперечной плоскости (опорные колеса плуга стоят на дне борозды); III-III – ось вращения плуга во время изменения положения оси подвеса по высоте при шарнирном соединении плуга с трактором в поперечной плоскости (опорные колеса плуга стоят на поверхности поля); r – расстояние от центра лемеха до поворотной оси плуга схемы II-II, м; l – расстояние от центра лемеха заднего рабочего органа до поворотной оси плуга схемы I-I, м; L – расстояние от оси подвеса до поворотной оси плуга схемы I-I, м; ρ – расстояние от оси проходящей через линию тяги пахотного агрегата до поворотной оси плуга схемы II-II

Fig. 1. Structural designs of semi-mounted plows

I-I – the plow rotation axis during a change in the suspension axis position in height with a rigid connection of the plow with a tractor in the transverse plane; II-II – the plow rotation axis during a change in the suspension axis position in height when the plow is hinged with a tractor in the transverse plane (the plow support wheels rest on the furrow bottom); III-III – the plow rotation axis during a change in the suspension axis position in height when the plow is hinged with a tractor in the transverse plane (the plow support wheels rest on the field surface); r – the distance from the plowshare center to the rotary axis of the plow of structural design II-II, m; l – the distance from the plowshare center of the rear working body to the rotary axis of the plow of structural design I-I, m; L – the distance from the suspension axis to the rotary axis of the plow of structural design I-I, m; ρ – the distance from the axis passing through the thrust line of the tillage unit to the rotary axis of the plow of structural design II-II

бины, но и удельного сопротивления, зависящего от углов постановки корпуса относительно направления движения МТА.

Недостаток плугов второй группы выражается в том, что почти весь вес плуга принимается опорными колесами, то есть догружение колес трактора меньше, чем плугами первой группы.

Для определения рациональных конструктивных параметров плуга как объекта регулирования необходимо знать влияние расположения и типа опор, взаимного расположения корпусов на характер изменения тягового сопротивления и глубины обработки почвы при подаче управляющего воздействия.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим на при-

мере влияние положения оси вращения $\theta-\theta$, зависящее от местоположения опор, и перекрытие корпусов Δb на форму подрезаемого пласта (рис. 2). На рисунках 2a, 2c, 2e показана форма пласта при $\Delta b = 0,5b$, а на рисунках 2b, 2d, 2f – при $\Delta b = 0,1b$. При подъеме оси подвеса длина режущей кромки l_p (край рабочего органа, отрезающий почвенный пласт от монолита) увеличивается ступенчато от $l_p = a + b$ при $\psi = 0^\circ$ до $l_p = a + b + \Delta b$ при $\psi > 0^\circ$ (a – глубина обработки почвы, м; b – ширина захвата одного корпуса, м; ψ – угол установки корпуса в поперечной плоскости, град.). Дальнейшее увеличение угла ψ при условии $AO \leq AB$ (AO – расстояние между точками A и O , м; AB – расстояние между точками A и B , м) приводит к уменьшению длины l_p , но при этом появляется участок ломанной $AE = AK + KE$, на котором происходит скалывание почвы (AE, AK, KE – расстояние между точками A и E, A и K, K и E соответственно, м).

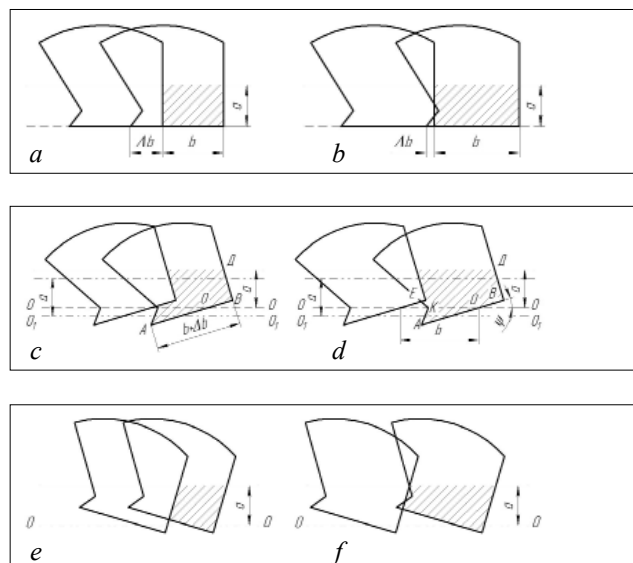


Рис. 2. Формы пласта, подрезаемого корпусом отвального плуга: a – глубина обработки почвы, м; b – ширина захвата одного корпуса, м; ψ – угол установки корпуса в поперечной плоскости, град.; Δb – перекрытие корпусов, м; $\theta-\theta$ и $\theta_1-\theta_1$ – оси вращения плуга при различных положениях точек опор

Fig. 2. Forms of soil layers cut by the body of a moldboard plow a – tillage depth, m; b – operating width of one body, m; ψ – the body setting angle in the transverse plane, deg.; Δb – the overlap of bodies, m; $\theta-\theta$ and $\theta_1-\theta_1$ – axes of plow rotation at different positions of support points

Характер изменения длины режущей кромки l_p и площади сечения подрезаемого почвенного пласта F, m^2 , существенно зависит от расположения осей вращения плуга $\theta-\theta$ и $\theta_1-\theta_1$ при различных положениях точек опор (рис. 2). Определим зависимость l_p и F от изменения угла ψ . Для этого введем обозначения (рис. 2c, 2d):

$$\frac{AO}{b + \Delta b} = \lambda; \frac{OB}{b + \Delta b} = 1 - \lambda. \quad (1)$$

Заметим, что на участке $AB + BD$ происходит резание почвы, а на участке AE – скалывание.

Для достаточно малых значений угла ψ будет справедливо:

$$tg\psi = \psi. \tag{2}$$

При $\psi > 0^\circ$ резание и скалывание происходит на участке $AB+BD+AE$, для которого l_p определяем по формуле:

$$l_p = a + b + \Delta b + \psi \cdot \lambda \cdot (b + \Delta b), \tag{3}$$

а площадь сечения подрезаемого пласта:

$$F = a \cdot (b + \Delta b) + \psi \cdot (b + \Delta b)^2 \cdot (\lambda - 0,5). \tag{4}$$

Аналогично можно определить l_p и F при $\psi < 0^\circ$. Считая, что тяговое сопротивление пропорционально площади сечения пласта (на лемех приходится около 50-60% сопротивления, а на отвал – 40-50%), а также ориентировочно принимая, что сопротивление P , H , состоит из сопротивления резания P_p и крошения $P_{кр}$, при условии $P_p = P_{кр} = 0,5P$, запишем определяющие их зависимости:

$$P_p = k' \cdot (a + b); P_{кр} = k'' \cdot (a \cdot b). \tag{5}$$

где k' и k'' – удельное сопротивление резания и крошения соответственно, Н/м.

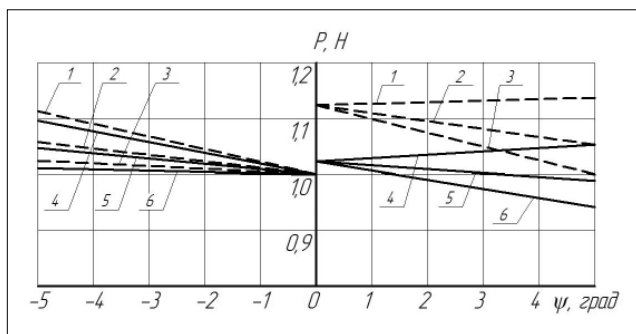


Рис. 3. Расчетные зависимости тягового сопротивления P ($P=1$ при $\psi=0^\circ$) от ψ при различных λ и Δb :

1) $\lambda = 0,5; \Delta b = 0,13$; 2) $\lambda = 0; \Delta b = 0,13$; 3) $\lambda = -0,5; \Delta b = 0,13$; 4) $\lambda = 0,5; \Delta b = 0,03$; 5) $\lambda = 0; \Delta b = 0,03$; 6) $\lambda = -0,5; \Delta b = 0,03$
 Fig. 3. Estimated relationship between traction resistance P ($P=1$ at $\psi=0^\circ$) and ψ for various λ and Δb

При изменении угла ψ от 0° в сторону «+» происходит скачок тягового сопротивления, обусловленный вступлением в работу заднего конца лемеха и зависящий от величины перекрытия (рис. 3). Кроме того, при увеличении ψ тяговое сопротивление зависит от λ , то есть от положения оси вращения плуга $0-0$. Тяговое сопротивление уменьшается тем интенсивнее, чем меньше величина λ .

Для поиска схемы плуга, в наибольшей степени отвечающей требованиям автоматического регулирования, проведены специальные исследования [2, 5] В результате отобраны три схемы (рис. 1).

Плуг *схемы I* жестко соединен с трактором в поперечной плоскости и опирается в рабочем и транспортном положении на одно заднее бороздное колесо. При изменении положения оси подвеса по высоте плуг поворачивается относительно оси $I-I$. При этом в первоначальный момент изменяется глубина только передних корпусов, а в дальнейшем – в результате дублирования задним колесом dna борозды и у задних корпусов [3].

Плуг *схемы II* имеет шарнирное соединение с трактором в поперечной плоскости и опирается в рабочем положении на переднее и заднее бороздные колеса. Изменение положения оси подвеса по высоте приводит к повороту этого плуга относительно оси $II-II$ и некоторому изменению глубины вспашки. Первоначальное изменение глубины зависит от расстояния между осью $II-II$ и корпусами. Дальнейшее изменение глубины происходит в ходе дублирования у задних корпусов аналогично плугу *схемы I* (рис. 4).

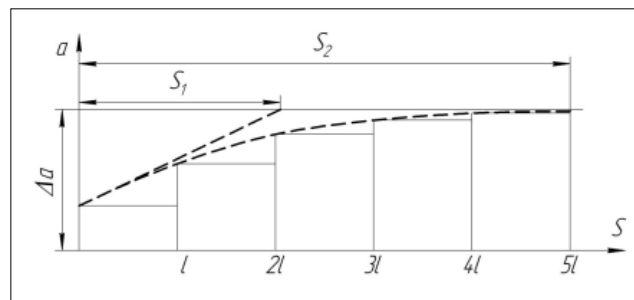


Рис. 4. Изменение глубины обработки при дублировании опорой плуга рельефа dna борозды:

S_1 и S_2 – постоянные пути, м; Δa – изменение средней глубины вспашки, м; S – пройденный плугом путь, м

Fig. 4. Change in tillage depth when the plow support follows of the furrow bottom relief

S_1 and S_2 – constant paths, m; Δa – the change in the average tillage depth, m; S – path traveled by the plow, m

Как видим, при скачкообразном изменении высоты оси подвеса и дублировании задним колесом dna борозды получается ступенчатый.

Но если представить, что оно не ступенчатое, то передаточная функция W в этом случае может быть представлена как для интегро-дифференцирующего звена (рис. 1, 4):

$$W_{ab(p)} = \frac{K \cdot (S_1 \cdot \rho + 1)}{S_2 \cdot \rho + 1}; \tag{6}$$

$$S_2 = L \text{ (схема I)}; \tag{7}$$

$$S_2 = \frac{l \cdot \rho}{r} \text{ (схема II)}, \tag{8}$$

где r – расстояние от центра лемеха до поворотной оси плуга, м;

K – коэффициент усиления.

Известны значения постоянных пути S_1 и S_2 и ко-



ЗНАЧЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ ПУТИ И КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ДЛЯ ДЕВЯТИКОРПУСНЫХ ПЛУГОВ* VALUES OF PATH CONSTANTS AND THE GAIN RATIO FOR NINE-BODY PLOWS*						
Параметры Parameter	Схема I / Structural design I			Схема II / Structural design II		
	K	S_1	S_2	K	S_1	S_2
Расчетный / Estimated	0,53	0,8	8,0	1,0	0,8	6,0
Эксперимент / Experimental	0,48-0,52	0,8	7,4-8,5	0,87-0,98	0,8	5,5-6,3

* K – коэффициент усиления; S_1 и S_2 – постоянные пути, м.
* K – the gain ratio; S_1 and S_2 – constant paths, m.

эффицента усиления K для девятикорпусных плугов (таблица) [2].

Плуг *схемы III* кинематически похож на плуг *схемы II* с той разницей, что опорные колеса стоят на поверхности поля вблизи корпусов, а уменьшение глубины вспашки достигается при опускании оси подвеса. Плуг *схемы III* способен обрабатывать более высокие частоты, чем два первых, так как его характеристика близка к характеристике усилительного звена.

Плуги *схемы II* и *III*, в отличие от плуга *схемы I*, меньше догружают ведущие колеса трактора, зато они способны в большей степени изменять тяговое сопротивление без существенного ухудшения агротехники. У этих схем при варьировании положения оси подвеса по высоте изменяются не только глубина вспашки, но и углы установки корпусов в продольной φ и поперечной ψ плоскостях. Изменение этих углов по-разному сказывается на значении тягового сопротивления (рис. 5) [2, 4]. Поскольку поперечный угол ψ меняется более интенсивно, чем продольный φ , то наиболее предпочтительной схемой плуга станет *схема III*. В этом случае знак изменения тягового сопротивления, зависящего от глубины вспашки $P = f(a)$ и от угла установки корпуса $P = f(\psi)$, совпадает.

Испытания трех схем плугов на почве с удельным сопротивлением 0,8 кг/см² показали, что изменение тягового сопротивления ΔP на единицу изменения средней глубины вспашки Δa составляет для плуга *схемы I* 146 кг/см, для *схемы II* – 128 и для *схемы III* – 210 кг/см.

При обосновании схемы плуга необходимо учитывать не только агротехнические и технико-экономические показатели, но и требования охраны труда. Работа системы автоматического регулирования не должна ухудшать плавность хода трактора и увеличивать уровень колебаний на сидении тракториста. Собственные частоты трактора К-701 для вертикаль-

ных и продольно-угловых колебаний в зависимости от давления в шинах и типа присоединенного плуга составляют, соответственно, $\omega_1 = 5,5-7,3 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_2 = 12,5-18 \text{ с}^{-1}$, то есть входят в диапазон частот работы системы или близки к нему. А момент инерции относительно оси поворота составляет 11800 кг·м/с² для плуга I *схемы I*; 260 кг·м/с² для плуга II *схемы I*; 100 кг·м/с² для плуга *схемы III*, у которого ось вращения проходит через центр тяжести. Как видим, у плуга *схемы I* момент инерции в десятки раз больше, чем в двух других схемах. Отсюда больше и силовое воздействие этого плуга на трактор.

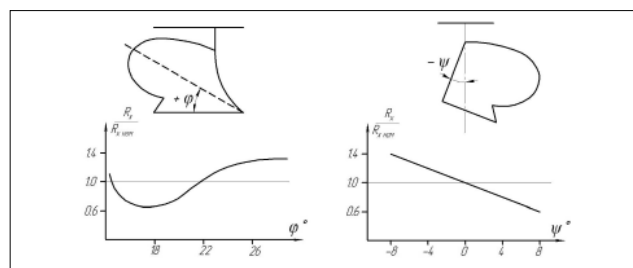


Рис. 5. Зависимость тягового сопротивления от углов установки корпусов в продольной (φ) и поперечной (ψ) плоскостях
Fig. 5. Relationship between traction resistance and the body setting angles in the longitudinal (φ) and transverse (ψ) planes

Выводы. Наиболее пригодным плугом для агрегатирования с энергонасыщенными тракторами, оборудованными системами автоматического регулирования, следует признать полунавесной плуг, имеющий шарнирное соединение с трактором в поперечной плоскости, и опорные колеса, установленные на поверхности поля. На испытаниях этот плуг показал высокую технологическую надежность, существенное увеличение производительности (при силовом регулировании до 10-11%) без ухудшения условий труда тракториста и агротехнических показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов Р.С., Мударисов С.Г., Рахимов И.Р. Разработка ресурсосберегающей технологии и обоснование параметров комплекса машин для возделывания сельскохозяйственных культур в зоне Урала // *Вестник БГАУ*. 2018. N2(46). С. 121-134.
2. Рахимов Р.С., Свечников П.Г., Мухаматнуров М.М., Граков Ф.Н. Универсальное орудие для возделывания картофеля // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2004. N9. С. 19-20.
3. Рахимов Р.С. Определение металлоемкости орудий при

их проектировании // *АПК России*. 2015. Т. 74. С. 110-117.

4. Гордеев О.В., Саврасова Н.Р. Применение теории удара для определения процента поврежденных клубней картофеля // *Агропродовольственная политика России*. 2015. №1. С. 62-65.

5. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., Mazitov N.K., Rakhimov R.S., Khamaletdinov R.R., Rakhimov I.R., Farkhutdinov I.M., Mukhametdinov A.M., Gareev R.T. Modeling the technological process of tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019. 190. 70-77.

6. Ani O.A., Uzoejinwa B.B., Ezeama A.O., Onwualu A.P., Ugwu S.N., Ohagwu C.J. Overview of soil-machine interaction studies in soil bins. *Soil Tillage Research*. 2018. 175. 13-27.

7. Armin A., Fotouhi R., Szyszkowski W. Experimental and finite element analysis for mechanics of soil-tool interaction. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. 2017. 11(2). 433-439.

8. Sun J., Sun Y. Wang, Ma Y., Tong J., Zhang Z. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth & 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*. 2018. 119. 30-37.

9. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling. *Information Processing in Agriculture*. 2015. Vol. 2. Issue 2. 130-141.

10. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion. *Biosystems Engineering*. 2015. 129. 298-306.

11. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystems Engineering*. 2017. 155. 44-54

12. Gabitov I.I., Mudarisov S.G., Gafurov I.D., et al. Evaluation of the efficiency of mechanized technological processes of agricultural production. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. Issue 10. 8338-8345.

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

REFERENCES

1. Rakhimov R.S., Mudarisov S.G., Rakhimov I.R. Razrabotka resursosberegayushchey tekhnologii i obosnovanie parametrov kompleksa mashin dlya vozdeystviya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v zone Urala [Development of resource-saving technology and determination of the parameters of a set of machines used for cultivating crops in the Urals]. *Vestnik BGAIU*. 2018. N2(46). 121-134 (In Russian).

2. Rakhimov R.S., Svechnikov P.G., Mukhamaturov M.M., Grakov F.N. Universal'noe orudie dlya vozdeystviya kartofelya [Universal potato cultivator]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 2004. №9. 19-20 (In Russian).

3. Rakhimov R.S. Opredelenie metalloyemkosti orudiy pri ikh proektirovanii [Determining metal consumption of units during their designing]. *АПК России*. 2015. Vol. 74. 110-117 (In Russian).

4. Gordeev O.V., Savrasova N.R. Primenenie teorii udara dlya opredeleniya protsenta povrezhdennykh klubney kartofelya [Application of shock theory to determine the amount of damaged potato tubers]. *Агропродовольственная политика России*. 2015. №1. 62-65 (In Russian).

5. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Ya.P., Mazitov N.K., Rakhimov R.S., Khamaletdinov R.R., Rakhimov I.R., Farkhutdinov I.M., Mukhametdinov A.M., Gareev R.T. Modeling the technological process of tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019. Vol. 190. 70-77 (In English).

6. Ani O.A., Uzoejinwa B.B., Ezeama A.O., Onwualu A.P., Ugwu S.N., Ohagwu C.J. Overview of soil-machine interaction studies in soil bins. *Soil Tillage Research*. 2018. 175. 13-27 (In English).

7. Armin A., Fotouhi R., Szyszkowski W. Experimental and

finite element analysis for mechanics of soil-tool interaction. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. 2017. 11(2). 433-439 (In English).

8. Sun J., Sun Y. Wang, Ma Y., Tong J., Zhang Z. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth & 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*. 2018. 119. 30-37 (In English).

9. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling. *Information Processing in Agriculture*. 2015. Vol. 2. Issue 2. 130-141 (In English).

10. Ucgul M., Fielke J.M., Saunders C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion. *Biosystems Engineering*. 2015. 129. 298-306 (In English).

11. Ucgul M., Saunders C., Fielke J.M. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystems Engineering*. 2017. 155. 44-54 (In English).

12. Gabitov I.I., Mudarisov S.G., Gafurov I.D., et al. Evaluation of the efficiency of mechanized technological processes of agricultural production. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. Issue 10. 8338-8345 (In English).

13. Lobachevskiy YA.P., Starovojtov S.I., Chemisov N.N. Energeticheskaya i tekhnologicheskaya otsenka pochvoobrabatyvayushchego rabochego organa [Energy and technological assessment of tillage working body]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. №5. 10-13 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 19.06.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 19.06.2019

Статья принята к публикации 18.10.2019
The paper was accepted
for publication on 18.10.2019