



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.316.022

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-33-39

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ МЕЛКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

КАМБУЛОВ СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ, *д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник¹, профессор²*
kambulov.s@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>

БОЖКО ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ , *канд. техн. наук, старший научный сотрудник¹*
i.v.bozhko@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>

БАБЕНКО ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА, *ассистент²*
lelya.babenko.90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0563-8639>

ПАРХОМЕНКО ГАЛИНА ГЕННАДЬЕВНА, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник¹*
parkhomenko.galya@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>

¹ Аграрный научный центр «Донской»; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. им. Ленина, 14

² Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Аннотация. Мелкая обработка почвы в технологическом процессе возделывания сельскохозяйственных культур является одной из ключевых операций по подготовке почвы к посеву. С целью установления оптимальных параметров рабочего органа для мелкой обработки почвы разработана конструкция с возможностью использования различных основных исполнительных элементов (плоскорезущей лапы и накладки стойки). Критерием оптимизации параметров рабочего органа являлось тяговое сопротивление. Проведены экспериментальные исследования в полевых условиях. Определение оптимальных параметров функционирования рабочего органа для мелкой обработки почвы производилось по стерневому фону озимой пшеницы после обработки дисками в один след. Методика проведения экспериментальных исследований основывалась на планировании многофакторного эксперимента. За основные изменяющиеся факторы в экспериментальных исследованиях приняты угол раствора лемехов плоскорезущей лапы рабочего органа, угол заточки стойки рабочего органа и глубина обработки почвы рабочим органом. В ходе обработки данных и проведения расчетов получено уравнение регрессии, позволяющее производить расчет тягового сопротивления в зависимости от заданных параметров рабочего органа и глубины обработки почвы. В результате экспериментальных исследований в диапазоне исследуемых скоростей 6,84...11,37 км/ч определены оптимальные параметры рабочего органа: угол раствора лемехов плоскорезущей лапы (104°) и угол заточки стойки рабочего органа (50°). При скорости обработки почвы 8,20 км/ч наименьшее тяговое сопротивление, создаваемое одним рабочим органом шириной захвата 0,5 м, на глубине обработки 8 см достигает 1,902 кН, при 12 см – 2,482 кН, а при 16 см – 4,758 кН. Полученные данные могут быть использованы при проектировании рабочих органов и сельскохозяйственных машин для мелкой обработки почвы.

Ключевые слова: оптимальные параметры, рабочий орган, мелкая обработка почвы, тяговое сопротивление, многофакторный эксперимент, угол заточки стойки, угол раствора лемехов плоскорезущей лапы.

Формат цитирования: Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г. Результаты исследований по определению оптимальных параметров рабочего органа для мелкой обработки почвы // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 3. С. 33-39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-33-39>.



© Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г., 2022



ORIGINAL PAPER

RESEARCH RESULTS ON DETERMINING THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE WORKING TOOL FOR SHALLOW TILLAGE

SERGEY I. KAMBULOV, *DSc (Eng), Associate Professor, Chief Research Associate¹, Professor²*
kambulov.s@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>

IGOR V. BOZHKO , *PhD (Eng), Senior Research Associate¹*
i.v.bozhko@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>

OLGA S. BABENKO, *Assistant²*
lelya.babenko.90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0563-8639>

GALINA G. PARKHOMENKO, *PhD (Eng), Lead Research Associate¹*
parkhomenko.galya@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>

¹ Agricultural Research Center “Donskoy”; 14, Lenina Str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russian Federation

² Don State Technical University; 1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, Rostov Region, 344003, Russian Federation

Abstract. At present, shallow tillage plays a leading role in the technological process of cultivating agricultural crops, as it is one of the key operations in soil preparing for sowing. To establish the optimal parameters of the working tool for shallow tillage, the authors

designed the tool capable of using various main operating elements (a flat hoe and a post lining). The main criterion for optimizing the parameters of the working tool was the traction resistance. Experimental studies were carried out in the field conditions. The optimal operating parameters of the working tools for shallow tillage were determined against the stubble background of winter wheat after its disc plowing in one track. The experimental research methodology included planning a multi-factorial experiment. The main changing factors included: the share opening angle of the flat hoe of the working tool; the sharpening angle of the working tool post and the soil cultivation depth by the working tool. Based on data processing and analysis, the authors obtained a regression equation, which helps calculate the traction resistance depending on the specified parameters of the working tool and the soil cultivation depth. As a result of experimental studies, the optimal parameters of the working tool were determined: the share opening angle of the flat hoe $g = 104^\circ$, as well as the sharpening angle of the working tool post $f = 50^\circ$. At a tillage speed of 8.20 km/h, the minimum traction forces generated by a single working tool with an operating width of 0.5 m at the depth of 8 cm is 1.902 kN, at 12 cm – 2.482 kN and at 16 cm – 4.758 kN. The data obtained can be used in the design of working tools and agricultural machines for shallow soil cultivation.

Key words: optimal parameters, working tool, shallow tillage, traction resistance, multi-factorial experiment, sharpening angle of the working tool post, share opening angle of a flat hoe.

For citation: Kambulov S.I., Bozhko I.V., Babenko O.S., Parkhomenko G.G. Research results on determining the optimal parameters of the working tool for shallow tillage. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(3): 33-39. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-33-39>.

Введение. Мелкой обработкой почвы принято считать обработку поверхностного слоя почвы на глубину до 16 см. К операциям мелкой и поверхностной обработки почвы относятся лущение, боронование, культивация, прикатывание.

Тяговое сопротивление, создаваемое почвообрабатывающими машинами для мелкой обработки почвы, рассматривалось многими авторами. Результаты исследования [1] подтверждают наибольшее влияние глубины обработки почвы на тяговое сопротивление рабочего органа для мелкой обработки почвы по сравнению с углом установки и поступательной скоростью движения агрегата.

Существенная экономия энергозатрат может быть получена путём выбора энергоэффективных почвообрабатывающих орудий [2, 3]. Авторами [4] разработана модель для исследования взаимодействия рабочего органа с почвой в конкретных экспериментальных условиях.

Общее уравнение регрессии для определения тягового сопротивления с использованием двух независимых переменных (скорости и глубины) можно использовать для прогнозирования необходимой тяги энергосредства при проектировании почвообрабатывающих орудий [5]. По данным авторов, значительное увеличение тягового сопротивления при уровне

значимости 0,05 наблюдалось для почвообрабатывающих рабочих органов с увеличением глубины и скорости.

Авторами [6, 7] подтверждено значительное увеличение тягового сопротивления почвообрабатывающих рабочих органов с ростом глубины и скорости. Установлены [8-10] зоны рыхления культиваторных лап, а также качественные показатели рыхлительно-сепарирующих машин.

Необходимо проведение исследований по определению оптимальных параметров рабочих органов для мелкой обработки почвы. Определение оптимальных параметров рабочего органа для мелкой обработки почвы позволит сократить затраты энергоресурсов при проведении технологической операции обработки почвы, а также позволит более рационально использовать энергоресурсы тракторов различного класса тяги при проектировании почвообрабатывающих машин различной ширины захвата.

Цель исследований: определить оптимальные параметры рабочего органа для мелкой обработки почвы, обеспечивающие наименьшее тяговое сопротивление.

Материалы и методы. В отделе механизации растениеводства ФГБНУ «АНЦ «Донской» разработана конструкция рабочего органа для мелкой обработки почвы (рис. 1).

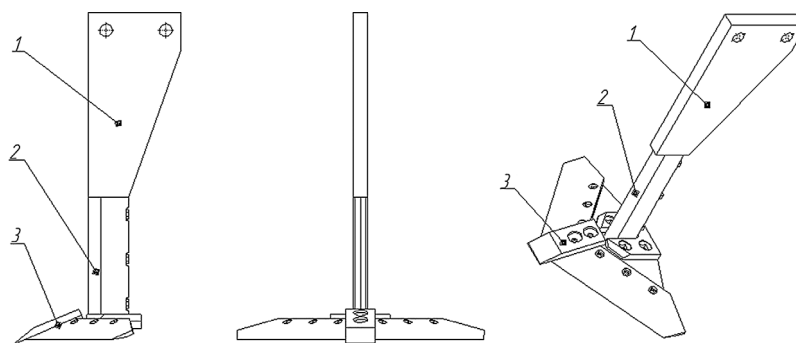


Рис. 1. Рабочий орган для мелкой обработки почвы:
1 – стойка рабочего органа; 2 – накладка; 3 – плоскорежущая лапа

Fig. 1. Working tool for shallow tillage:
1 – working tool post; 2 – lining; 3 – flat hoe

Основные исполнительные элементы рабочего органа, накладка и плоскорежущая лапа выполнены в различных конструктивных параметрах. Для установления оптимального угла заточки стойки рабочего органа накладки

выполнены в диапазоне $30...70^\circ$, для установления оптимального угла раствора лемехов плоскорежущей лапы – в диапазоне $94...114^\circ$ (рис. 2). Выбор данных диапазонов углов заточки стойки рабочего органа, а также углов

раствора лемехов плоскорежущей лапы основывался на многолетних исследованиях по разработке конструкций рабочих органов почвообрабатывающих машин, так

как эти параметры оказывают непосредственное влияние на показатель тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом.

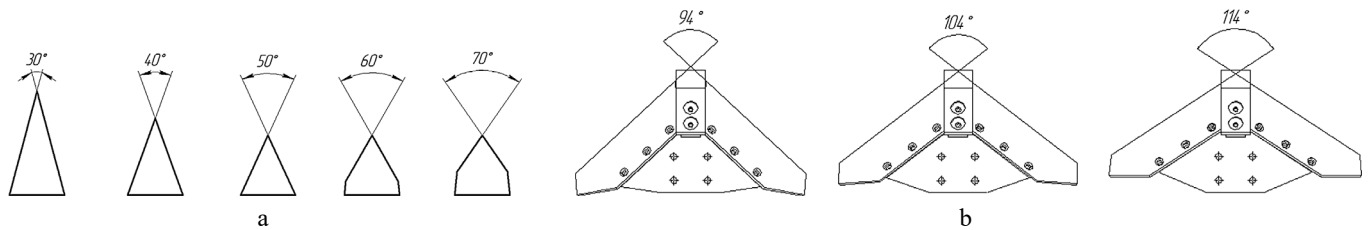


Рис. 2. Исполнительные элементы рабочего органа:

a – накладки с различными углами заточки; b – плоскорежущие лапы с различными углами раствора лемехов

Fig. 2. Operating elements of the working tool:

a – linings with different sharpening angles; b – flat hoes with different share opening angles

Накладка и плоскорежущая лапа рабочего органа выполнены с возможностью замены по мере износа, что в свою очередь указывает на высокий уровень ремонтопригодности предлагаемой конструкции и на снижение трудозатрат при его техническом обслуживании. Исследования по определению оптимальных параметров рабочего органа проводились на экспериментальной установке [11] (рис. 3).

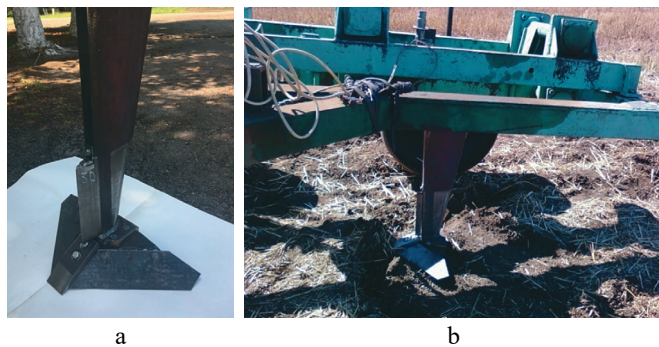


Рис. 3. Рабочий орган (а) и экспериментальная установка (б)

Fig. 3. Working tool (a) and experimental installation (b)

Экспериментальные исследования проводились для всех вариантов накладок и плоскорежущих лап. Определение оптимальных параметров функционирования рабочего органа для мелкой обработки почвы производилось по стерневому фону озимой пшеницы после дискования в один след на глубину до 8 см. Тип почвы по механическому составу: чернозем обыкновенный малогумусный на лессовидных глинах. Микрорельеф поля во время проведения исследований составил: 2,3 см – продольный; 2,4 см – поперечный. Влажность почвы на обрабатываемой глубине – до 30%; твердость почвы – до 2,8 МПа. Исследования проводились на установочных скоростях при работе с культиваторами и составляли: 6,84 км/ч; 8,20 км/ч; 11,37 км/ч.

В качестве измерительного датчика для определения тягового сопротивления используется шарнирное тензометрическое звено, самоустанавливающееся по линии тяги в направлении движения агрегата в механизме крепления экспериментальной установки (рис. 4).

За изменяющиеся факторы в эксперименте были приняты глубина обработки почвы рабочим органом, угол раствора лемехов плоскорежущей лапы рабочего органа и угол заточки стойки рабочего органа.

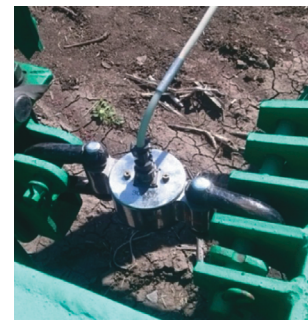


Рис. 4. Тензометрическое звено

Fig. 4. Strain gauge link

Методика экспериментального исследования влияния глубины обработки почвы, угла раствора лемехов плоскорежущей лапы и угла заточки стойки рабочего органа на создаваемое тяговое сопротивление рабочим органом, являющимся критерием оптимизации, основана на планировании многофакторного эксперимента^{1,2}.

Для получения квадратичной модели и нахождения оптимума принят трехуровневый план для трех факторов (план Бокса-Бенкина) (табл. 1).

Перед началом эксперимента факторы кодировались по формулам:

$$\chi_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (1)$$

где χ_i – кодированное значение фактора; X_i – натуральное значение фактора; X_{0i} – натуральное значение фактора на нулевом уровне; ε_i – натуральное значение интервала варьирования фактора;

$$\varepsilon = \frac{X_{iв} - X_{iн}}{2}, \quad (2)$$

где $X_{iв}$ – натуральное значение фактора на верхнем уровне (+1); $X_{iн}$ – натуральное значение фактора на нижнем уровне (-1).

¹ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

² Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Изд. второе, перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 280 с.

Таблица 1

Обозначения факторов и интервалы варьирования

Table 1

Designations of factors and intervals of variation

Наименование фактора и обозначения <i>Factor name and designation</i>	Обозначение <i>Designation</i>	Уровни варьирования <i>Variation levels</i>			Интервал варьирования фактора <i>Factor variation interval</i>
		-1	0	+1	
Угол раствора лемехов плоскорезущей лапы <i>g</i> , град. <i>Share opening angle of the flat hoes g, degrees</i>	X ₁	94	104	114	10
Угол заточки стойки рабочего органа <i>f</i> , град. <i>Sharpening angle of the working tool post f, degrees</i>	X ₂	30	50	70	20
Глубина обработки почвы <i>h</i> , см / <i>Tillage depth h, centimeters</i>	X ₃	8	12	16	4

Матрица планирования эксперимента согласно плану Бокса-Бенкина в кодированном виде представлена в таблице 2.

Согласно плану эксперимента на установке фиксировалась глубина обработки почвы, а на стойке рабочего органа устанавливались углы заточки стойки и раствора лемехов плоскорезущей лапы, при которых

производились измерения тягового сопротивления при устойчивом режиме работы трактора.

Обработка полученных данных производилась с помощью программ Microsoft Excel и STATISTICA.

Результаты и их обсуждение. В результате проведения экспериментальных исследований были получены данные тягового сопротивления (табл. 2).

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

Table 2

Planning matrix and experiment results

№ опыта <i>Experiment No.</i>	Значения факторов в закодированном виде <i>Factor values in an encoded form</i>			Значения факторов в натуральном виде <i>Factor values in a natural form</i>			Отклик P _T , кН <i>Response P_T, kN</i>
	X ₁	X ₂	X ₃	<i>g</i> , °	<i>f</i> , °	<i>h</i> , см / <i>centimeters</i>	
1	-1	-1	0	94	30	12	3,87
2	+1	-1	0	114	30	12	4,09
3	-1	+1	0	94	70	12	3,98
4	+1	+1	0	114	70	12	4,49
5	-1	0	-1	94	50	8	2,49
6	+1	0	-1	114	50	8	3,27
7	-1	0	+1	94	50	16	5,36
8	+1	0	+1	114	50	16	6,42
9	0	-1	-1	104	30	8	2,86
10	0	+1	-1	104	70	8	2,49
11	0	-1	+1	104	30	16	4,89
12	0	+1	+1	104	70	16	5,85
13	0	0	0	104	50	12	2,60
14	0	0	0	104	50	12	2,57
15	0	0	0	104	50	12	2,63

Эмпирическое уравнение регрессии представим в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2.$$

Последующая обработка экспериментальных данных заключалась в определении значимости коэффициентов уравнения регрессии. Для этого доверительный интервал

рассчитывали при табличном значении критерия Стьюдента по формуле:

$$\pm \Delta b_i = \pm t \cdot (S_{b_i})^2, \tag{3}$$

где Δb – доверительный интервал для коэффициентов регрессии; t – табличное значение критерия Стьюдента; S_{b_i} – квадратичная ошибка коэффициентов уравнения регрессии.

Значения коэффициентов уравнения регрессии и проверка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента представлены в таблице 3.

Анализ значимости коэффициентов математической модели по критерию Стьюдента при 5%-ном уровне

значимости (табл. 3) позволяет сделать вывод о том, что полученные расчетные значения показателей больше критического (квантиль), а число значимых коэффициентов в модели составляет 9, то есть все коэффициенты являются значимыми.

Таблица 3

Результаты проверки значимости коэффициентов математической модели по критерию Стьюдента

Table 3

Results of checking the significance of the coefficients of the mathematical model according to the Student's t-test

Коэффициент регрессии <i>Regression coefficient</i>	Значение коэффициента регрессии в закодированном виде <i>Value regression coefficient in an encoded form</i>	Расчетное t <i>Estimated t</i>	Табличное $t_{кр}$ <i>Tabular t_{cr}</i>
b_0		4,1716	2,16
b_1		0,3202	
b_{11}		-0,4661	
b_2		0,1378	
b_{22}		-0,2854	
b_3		1,4262	
b_{33}		-0,4244	
b_{12}		0,0733	
b_{13}		0,0722	
b_{23}		0,3323	

Таким образом, математическая модель в закодированном виде представлена следующим образом:

$$y = 4,1716 + 0,3202X_1 + 0,1378X_2 + 1,4262X_3 + 0,0733X_{12} + 0,0722X_{13} + 0,3323X_{23} - 0,4661X_1^2 - 0,2854X_2^2 - 0,4244X_3^2. \quad (4)$$

Для оценки значимости уравнения регрессии произведем проверку гипотезы о равенстве нулю коэффициента детерминации $R^2 (b_1 = b_2 = \dots = b_m = 0)$ с использованием F -критерия Фишера, вычисленного через коэффициент детерминации, зависящего от данных исследуемого процесса. Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии, дисперсия и коэффициент детерминации представлены в таблице 4.

Анализ данных таблицы 4 по критерию Фишера позволяет сделать заключение о том, что $F_{расч.} > F_{табл.}$. Следовательно, взаимосвязь между глубиной обработки почвы, углом раствора лемехов плоскорезущей лапы и углом заточки стойки значима на 5%-ном уровне значимости. Судя по коэффициенту детерминации $R^2 = 0,97596$ вариация тягового сопротивления на 97% связана с действием изучаемых факторов и 3% вариации не может быть объяснено влиянием этих переменных.

Таким образом, уравнение регрессии в натуральном виде выглядит следующим образом:

$$P_T = 113,3438 - 1,9471 \cdot g - 0,2237 \cdot f - 1,3121 \cdot h + 0,0004 \cdot g \cdot f + 0,0018 \cdot g \cdot h + 0,0042 \cdot f \cdot h + 0,0093 \cdot g^2 + 0,0014 \cdot f^2 + 0,0530 \cdot h^2, \quad (6)$$

где P_T – тяговое сопротивление, создаваемое рабочим органом, кН; g – угол раствора лемехов плоскорезущей лапы, град.; f – угол заточки стойки рабочего органа, град.; h – глубина обработки почвы, см.

Таблица 4
Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии, дисперсия и коэффициент детерминации

Table 4

Calculated values of the regression equation coefficient, dispersion, and determination coefficient

Коэффициент регрессии <i>Regression coefficient</i>	Значение коэффициента регрессии <i>Value regression coefficient</i>	Дисперсия <i>Dispersion</i>
b_0	113,3438	
b_1	-1,9471	0,8205
b_{11}	0,0093	3,2092
b_2	-0,2237	0,1518
b_{22}	0,0014	1,2030
b_3	-1,3121	16,2735
b_{33}	0,0530	2,6601
b_{12}	0,0004	0,0215
b_{13}	0,0018	0,0209
b_{23}	0,0042	0,4416
$S_{ал.}^2$		0,0685
$S_{воспр.}^2$		0,0009
$F_{расч.}$		76,12
$F_{табл.}$		3,59
R^2		0,97596

Для определения значений факторов, при которых тяговое сопротивление имеет наименьшее значение (искомый оптимум), брали частные производные по X_i . Решением полученной системы уравнений являются текущие

значения факторов X_i , при которых тяговое сопротивление P_T достигает минимального значения. Расчеты показали, что при значениях факторов $g = 102,5615^\circ$, $f = 52,7848^\circ$ и $h = 8,5548$ см тяговое сопротивление составит: $P_T = 1,859$ кН.

Получившееся уравнение регрессии в виде трехмерной поверхности отклика от взаимодействия факторов представлено на рисунке 5.

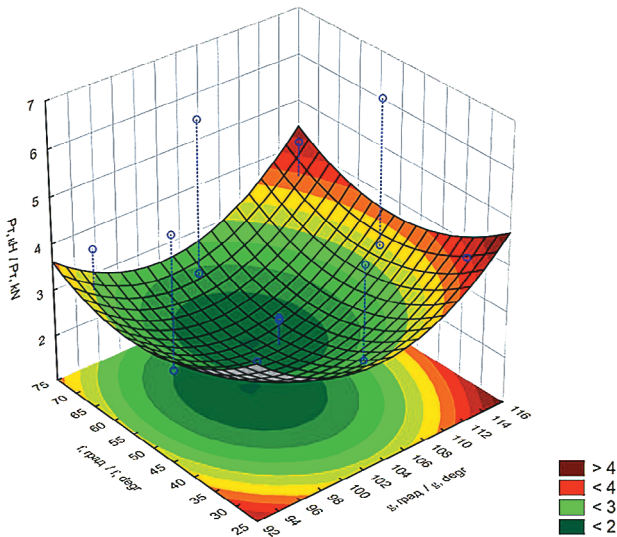


Рис. 5. Поверхность отклика тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом

Fig. 5. Response surface of the traction resistance offered by the working tool

Для получения поверхности отклика при трех значимых факторах фактор глубины обработки почвы h фиксировался на уровне 8 см. Поверхность отклика построена для скорости 8,20 км/ч.

Библиографический список

1. Moeenifar A., Mousavi-Seyedi S.R., Kalantari D. Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014; 16 (1): 69-74.
2. Ranjbarian S., Askari M., Jannatkah J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017; 16 (2): 154-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>
3. Askari M., Khalifahamzheghasem S. Draft force inputs for primary and secondary tillage implements in a clay loam soil. *World Applied Sciences Journal*, 2013; 21 (12): 1789-1794. <http://dx.doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.12.25>
4. Akbarnia A., Mohammadi A., Farhani F. et al. Simulation of draft force of winged share tillage tool using artificial neural network model. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014; 16 (4): 57-65.
5. Okoko P., Ajav E.A., Olosunde W.A. Draft and power requirements for some tillage implements operating in clay loam soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2018; 20 (1): 95-102.
6. Shahgholi G., Kanyawi N., Kalantari D. Modeling the Effects of Narrow Blade Geometry on Soil Failure Draught and Vertical Forces Using Discrete Element Method. *Yuzuncu*

Стоит учесть, что данные значения факторов лежат в области средних интервалов варьирования параметров рабочего органа $g = 104^\circ$, $f = 50^\circ$ и принимаются за оптимальные значения. Поскольку мелкая обработка почвы выполняется на глубину 8...16 см в соответствии с агротехническими требованиями, то с учётом вышеуказанных параметров рабочего органа тяговое сопротивление составит: $P_T = 1,902$ кН при $h = 8$ см; $P_T = 2,482$ кН при $h = 12$ см; $P_T = 4,758$ кН при $h = 16$ см.

В ходе исследований также установлено, что рабочий орган с углом заточки стойки 50° и 70° и углом раствора лемехов плоскорежущей лапы 94° , 104° и 114° соответствует предъявляемым агротехническим требованиям по всем качественным показателям технологического процесса мелкой обработки почвы (8...16 см). Эти параметры рабочего органа рекомендуются в качестве рациональных значений.

Выводы

1. Наименьшее тяговое сопротивление, создаваемое рабочим органом для мелкой обработки почвы, наблюдается при угле раствора лемехов плоскорежущей лапы, равном 104° , и угле заточки стойки 50° , при всем диапазоне исследуемых скоростей 6,84...11,37 км/ч.
2. При данных параметрах на глубине обработки 8 см тяговое сопротивление составит 1,902 кН, на глубине 12 см – 2,482 кН, а при глубине обработки 16 см – 4,758 кН. Данные показатели тягового сопротивления установлены при скорости обработки почвы 8,20 км/ч. Данные тягового сопротивления получены для одного рабочего органа с шириной захвата 0,5 м.
3. Полученные данные оптимальных параметров рабочих органов могут быть использованы при проектировании почвообрабатывающих машин для мелкой обработки почвы.

References

1. Moeenifar A., Mousavi-Seyedi S.R., Kalantari D. Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014; 16(1): 69-74.
2. Ranjbarian S., Askari M., Jannatkah J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017; 16(2): 154-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>
3. Askari M., Khalifahamzheghasem S. Draft force inputs for primary and secondary tillage implements in a clay loam soil. *World Applied Sciences Journal*, 2013; 21 (12): 1789-1794. <http://dx.doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.12.25>
4. Akbarnia A., Mohammadi A., Farhani F., Alimardani R. Simulation of draft force of winged share tillage tool using artificial neural network model. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014; 16(4): 57-65.
5. Okoko P., Ajav E.A., Olosunde W.A. Draft and power requirements for some tillage implements operating in clay loam soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2018; 20(1): 95-102.
6. Shahgholi G., Kanyawi N., Kalantari D. Modeling the Effects of Narrow Blade Geometry on Soil Failure Draught and Vertical Forces Using Discrete Element Method. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 2019; 29(1): 24-33. <http://dx.doi.org/10.29133/yyutbd.429950>
7. Al-Suhaibani S.A., Al-Janobi A.A., Al-Majhadi Y.N. Development and evaluation of tractors and tillage implements instrumentation

Yil University Journal of Agricultural Sciences, 2019; 29 (1): 24-33. <http://dx.doi.org/10.29133/yutbd.429950>

7. Al-Suhaibani S.A., Al-Janobi A.A., Al-Majhadi Y.N. Development and evaluation of tractors and tillage implements instrumentation system. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2010; 3 (2): 363-371. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2010.363.371>

8. Василенко В.В., Василенко С.В., Борзило В.С. Зона рыхления почвы культиваторной лапой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. № 4. С. 48-52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-48-52>

9. Сыромятников Ю.Н. Показатели качества работы почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. № 3. С. 38-44. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44>

10. Волик Б.А., Лепеть Є.І., Коновий А.В. Метод гідродинамічних аналогій в системі модельних досліджень ґрунтообробних машин // *Інженерія природокористування*. 2018. № 2 (10). С. 45-48.

11. Божко І.В., Пархоменко Г.Г., Громаков А.В., Максименко В.А., Камбулов С.І. Експериментальна установка для дослідження почвообрабатывающих рабочих органов // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. № 6. С. 37-42.

Критерии авторства

Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Камбулов С.И., Божко И.В., Бабенко О.С., Пархоменко Г.Г. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.11.2021

Одобрена после рецензирования 25.05.2022

Принята к публикации 26.05.2022

system. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2010; 3(2): 363-371. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2010.363.371>

8. Vasilenko V.V., Vasilenko S.V., Borzilo V.S. Zona rykhleniya pochvy kul'tivatornoj lapoy [Zone of soil loosening with a cultivator tine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2018; 12 (4): 48-52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-48-52> (In Rus.).

9. Syromyatnikov Yu.N. Pokazateli kachestva raboty pochvoobrabatyvayushchey rykhlytel'no-separiruyushchey mashiny [Performance quality indicators of a soil-cultivating loosening-separating machine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2018; 12(3): 38-44. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44> (In Rus.)

10. B.A. Volik, A.I. Lepet, A.V. Konovy. Metod hidrodynamichnykh analogiy v systemi model'nykh doslidzheny hruntoobrobnykh mashyn [Method of hydrodynamic analogies in the systems of model preliminaries of soil-tilling machines]. *Inzheneriya pryrodokorystuvannya*, 2018; 2 (10): 45-48. (In Ukr.).

11. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Gromakov A.V., Maksimenko V.A., Kambulov S.I. Eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov [Experimental installation for studying tillage working units]. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2017; 6: 37-42. (In Rus.).

Contribution

S.I. Kambulov, I.V. Bozhko, O.S. Babenko, G.G. Parkhomenko performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. S.I. Kambulov, I.V. Bozhko, O.S. Babenko, G.G. Parkhomenko have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 19.11.2021

Approved after reviewing 25.05.2022

Accepted for publication 26.05.2022