

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

кандидат технических наук **И. Е. Донцов**¹кандидат технических наук **М. Н. Лысыч**¹кандидат технических наук **М. Л. Шабанов**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Во время движения почвообрабатывающие машины и орудия совершают свободные и вынужденные колебания. Одновременно изменяются направление и значение сил сопротивления их рабочих органов. Без информации о силовых параметрах рабочих органов изучение динамики почвообрабатывающих машин, орудий и машинно-тракторных агрегатов невозможно. Статья посвящена изучению силовых параметров пассивных, активных и ротационных почвообрабатывающих рабочих органов. Для исследований отобраны наиболее распространенные виды и типы рабочих органов. Силовое взаимодействие рабочих органов с почвой представлено равнодействующей сил сопротивления. Модуль, направление и положение равнодействующей сил сопротивления зависят от положения рабочего органа по отношению к вектору абсолютной скорости точки приведения на рабочем органе и глубины обработки. Указанные функции описаны уравнениями регрессии второго порядка. За основу взята модель силового взаимодействия почвообрабатывающих рабочих органов с почвой, предложенная проф. Гячевым Л.В. Спроектирована и изготовлена тензометрическая установка, предложена методика определения описанных силовых параметров рабочих органов в лабораторных условиях. В ходе эксперимента рабочий орган устанавливают в различные положения по отношению к основному (прямолинейному) движению, регистрируют параметры, характеризующие его координаты (факторы) и усилия в тягах навесного оборудования (отклики). Затем вычисляют характеристики главного вектора и главного момента, равнодействующей сил взаимодействия рабочих органов с почвой. Результаты нескольких измерений аппроксимируют кривой, в наибольшей степени соответствующей характеру взаимодействия. Статистический анализ результатов показал, что регрессионные модели адекватны при уровне значимости 0.01. Коэффициенты корреляции между безразмерными коэффициентами геометрически подобных рабочих органов равны 0,95-0,97.

Ключевые слова: трактор, устойчивость, колебания, почва, силовые параметры, скорость движения

THE RESULTS OF LABORATORY STUDIES OF POWER SETTINGS OF SOIL-CULTIVATING WORKING BODIES

PhD in Engineering **I. E. Dontsov**¹PhD in Engineering **M. N. Lysych**¹PhD in Engineering **M. L. Shabanov**¹

1 – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and
Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation

Abstract

During the movement, tillage machines and tools make free and forced vibrations. At the same time the direction and value of forces of resistance to their working bodies change. Without information about the power parameters of working bodies it is impossible to study the dynamics of soil-cultivating machines, tools and machine-tractor units. The article is devoted to the study of power parameters of passive, active, and rotational soil-cultivating working bodies. For research the most common types of working bodies have been selected. Force interaction of working bodies with soil is represented by the resultant of forces of resistance. Module, direction and position of the resultant of the resistance forces depend on the position of the working body relative to the vector of the absolute velocity of the point cast on the working body and the depth of processing. These functions are described by regression equations of the second order. The basis is the model of force interaction of soil-cultivating working bodies

with soil, suggested by Professor L. V. Gyachev. Strain gauge installation is designed and manufactured; a method of determination of described power parameters of working bodies in the laboratory is suggested. In the experiment, working body is set in various positions relative to the main (straight) movement, the parameters characterizing the coordinates (factors) and effort in rods coupler (feedback) are recorded. Then the characteristics of the main vector and main moment of the resultant of forces of interaction of working bodies with soil are calculated. The results of several measurements approximate curve, mostly appropriate to the nature of the interaction. Statistical analysis of the results showed that the regression models are adequate at significance level of 0.01. The correlation coefficients between the dimensionless coefficients of geometrically similar working bodies are equal to 0.95-0.97.

Keywords: tractor, stability, fluctuations, soil, strength parameters, speed

В современной отечественной и зарубежной литературе [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] сведения о силовых параметрах движущихся (колеблющихся) орудий и рабочих органов, практически, отсутствуют либо имеют узко прикладной характер. Без этой информации изучение динамики почвообрабатывающих машин, орудий и МТА невозможно.

Модель силового взаимодействия рабочих органов с почвой подробно описана в работе [2]. Кратко ее суть сводится к тому, что для описания равнодействующей сил сопротивления рабочих органов использованы уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами $K_0 \dots K_8$. Уравнения имеют вид:

$$F = K_0 + K_1 a + K_2 \delta + K_3 a^2 + K_4 \delta^2 + K_5 a \delta + K_6 a^2 \delta + K_7 a \delta^2 + K_8 a^2 \delta^2, \quad (1)$$

где F – исследуемые функции (отклики):

F это R_{XY}/R_Y или R_{YZ}/R_Y , где R_{XY} и R_{YZ} – проекции равнодействующей, соответственно, на горизонтальную XY и продольно-вертикальную YZ плоскости по отношению к основному (прямолинейному) движению, Н;

R_Y – тяговое сопротивление рабочего органа при номинальной глубине, Н;

F это α_{XY} или α_{YZ} – углы поворота равнодействующей, соответственно, в плоскости XY или YZ , рад;

F это d_{XY}/l_0 или d_{YZ}/l_0 , где d_{XY} и d_{YZ} – смещение равнодействующей от точки приведения, соответственно, в плоскостях XY и YZ , м;

l_0 – длина рабочего органа, м;

a и δ – нормированная глубина и углы установки рабочего органа (варьируемые параметры – факторы): $a = a_f/a_H$, где a_f – фактическая, a_H – номинальная глубина обработки, см; δ это δ_{XY} или δ_{YZ} – углы установ-

ки рабочего органа, соответственно, в плоскостях XY и YZ , рад.

Отметим, что в описанной модели развиты основные положения, предложенные проф. Гячевым Л.В. [1]. Как видим, модель стала полипараметрической и более высокого порядка.

Предложена методика определения силовых параметров рабочих органов в лабораторных условиях, для чего спроектирована и изготовлена тензометрическая установка [3].

В табл. 1 приведен план ненасыщенного эксперимента для определения коэффициентов регрессии (1). Нормированные диапазоны (-1; +1) варьирования факторов выбирают с учетом значений, которые они принимают в реальных условиях (симметричный план – опыты с 1 по 9). При необходимости симметричный план дополняют несимметричными опытами, выходящими за реальные пределы варьирования параметров (опыты 10-12). В гипотетическом опыте на поверхности почвы ($a = 0$) вполне предсказуемы нулевые значения откликов.

В каждом опыте регистрируют следующие величины (рис. 1): усилия P_1, \dots, P_6 в тензометрических тягах (отклики); углы δ_{XY} и δ_{YZ} установки рабочего органа в плоскостях XY и YZ , а также глубину обработки a (факторы).

Углы δ_{XY} и δ_{YZ} между осью рабочего органа и направлением движения задают до проведения опыта, соответствующим образом закрепляя рабочий орган на оси подвеса навесного оборудования. До проведения основной серии опытов регистрируют начальное натяжение туг $P_{1,0}, \dots, P_{6,0}$ от силы тяжести навесного оборудования и рабочего органа. В дальнейших расчетах эти значения вычитают из значений, получаемых во время рабочего хода: $P_1 - P_{1,0}, \dots, P_6 - P_{6,0}$. Глубину обработки задают позиционно с помощью гидравлической

План эксперимента

Номер опыта	δ_{YZ} (δ_{YZ})	δ_{XY} (δ_{XY})	a	Примечания
	-	-	-	Определение силы тяжести навесного оборудования (начальное натяжение туг без заглубления рабочего органа)
1	0 (0)	0 (0)	a_{max}	Опыты с заглубленным рабочим органом (симметричный план)
2	0 (0)	0 (0)	$a_{среднее}$	
3	0 (0)	0 (0)	a_{min}	
4	0 (1)	1 (0)	a_{max}	
5	0 (1)	1 (0)	$a_{среднее}$	
6	0 (1)	1 (0)	a_{min}	
7	0 (-1)	-1 (0)	a_{max}	
8	0 (-1)	-1 (0)	$a_{среднее}$	
9	0 (-1)	-1 (0)	a_{min}	
	0	0	0	Гипотетический опыт на поверхности
10	0 (2)	2 (0)	a_{max}	Опыты с заглубленным рабочим органом (несимметричное дополнение)
11	0 (2)	2 (0)	$a_{среднее}$	
12	0 (2)	2 (0)	a_{min}	

навесной системы.

Для фиксированных значений варьируемых параметров из уравнений равновесия сил в проекциях на оси координат находим параметры равнодействующей сил взаимодействия рабочего органа с почвой. В продольно-вертикальной плоскости YZ они имеют вид

$$R_{YZ} = \sqrt{(Y)^2 + (Z)^2}$$

$$\alpha_{YZ} = \delta_{YZ} + \alpha'_{YZ} \quad (2)$$

$$\frac{d_{YZ}}{l_o} = \frac{M_{YZ}}{R_{YZ} l_o}$$

где $Y = P_1 + P_4 + P_5 + (P_2 + P_3 + P_6) \cos 45^\circ$

$$Z = (-P_2 + P_3) \cos 45^\circ$$

$$\alpha'_{YZ} = \arctg \frac{Z}{Y}$$

$$M_{YZ} = M_{1,YZ} + M_{2,YZ}$$

$$M_{1,YZ} = R_{YZ} [(z_D - 45) \cos \alpha_{YZ} + (y_D - 80) \sin \alpha_{YZ}]$$

$$M_{2,YZ} = 240P_1 - (P_4 + P_5)80 + [P_2(600 - 80) + P_3(240 - 600) - P_6 71] \cos 45^\circ.$$

В горизонтальной плоскости XY:

$$R_{XY} = \sqrt{(X)^2 + (Y)^2}$$

$$\alpha_{XY} = \delta_{XY} + \alpha'_{XY} \quad (3)$$

$$\frac{d_{XY}}{l_o} = \frac{M_{XY}}{R_{XY} l_o}$$

где $Y = P_1 + P_4 + P_5 + (P_2 + P_3 + P_6) \cos 45^\circ$

$$X = P_6 \cos 45^\circ$$

$$\alpha'_{XY} = \arctg \frac{X}{Y}$$

$$M_{XY} = -(M_{1,XY} + M_{2,XY})$$

$$M_{1,XY} = R_{XY} [(268 - x_D) \sin \alpha_{XY} + y_D \cos \alpha_{XY}]$$

$$M_{2,XY} = (P_4 - P_5)160 + [(P_2 - P_3)169 - P_6(412 - 160)] \cos 45^\circ.$$

Параметры x_D , y_D и z_D характеризуют выбранное положение точки приведения сил (т. D).

Для измерения усилий в тугах № 1, 4 и 5 использованы тензодатчики ZD 500 максимальная нагрузка – 500 кГ, нормативная точность измерений – 0,01 %; в тугах № 2, 3 и 6 – тензодатчики S 100 максимальная нагрузка – 100 кГ, нормативная точность – 0,01 %. По результатам тарирования фактическая точность датчиков оказалась в пределах 0,005 %.

Для исследований отобраны наиболее распространенные виды (рис. 2, 3) и типы рабочих органов, включая пассивные и ротационные. Постоянные геометрические и технологические параметры рабочих органов приведены в табл. 2. Все исследованные рабочие органы имели нормальную (острую) заточку.

Опыты проводились в закрытом помещении при комнатной температуре и нормальной влажности воздуха. Тип почвы в почвенном канале – супесь мелкокомковатая, твердость в исследуемом горизонте – 16-18 кПа, влажность – 12-14 %. В подготовке и проведении эксперимента принимал участие асп. Кузнецов А.А.

Результаты расчетов приведены в табл. 3. Здесь использованы библиотечные функции Microsoft Excel, с помощью которых вычислены коэффициенты регрессии (1) и оценен их уровень значимости.

Статистический анализ результатов показал, что регрессионные модели адекватны при уровне значимости $q=0,01$. Замечено, что для геометрически

подобных рабочих органов, например № 08, 09 и 10, безразмерные силовые параметры имеют близкие значения. Коэффициенты корреляции между силовыми параметрами геометрически подобных рабочих органов имеют значения 0,95-0,97. При уровне значимости $q= 0,001$ t -критерии Стьюдента равны $t_{расч} = 13,7-17,4$; $t_{табл} = 3,85$.

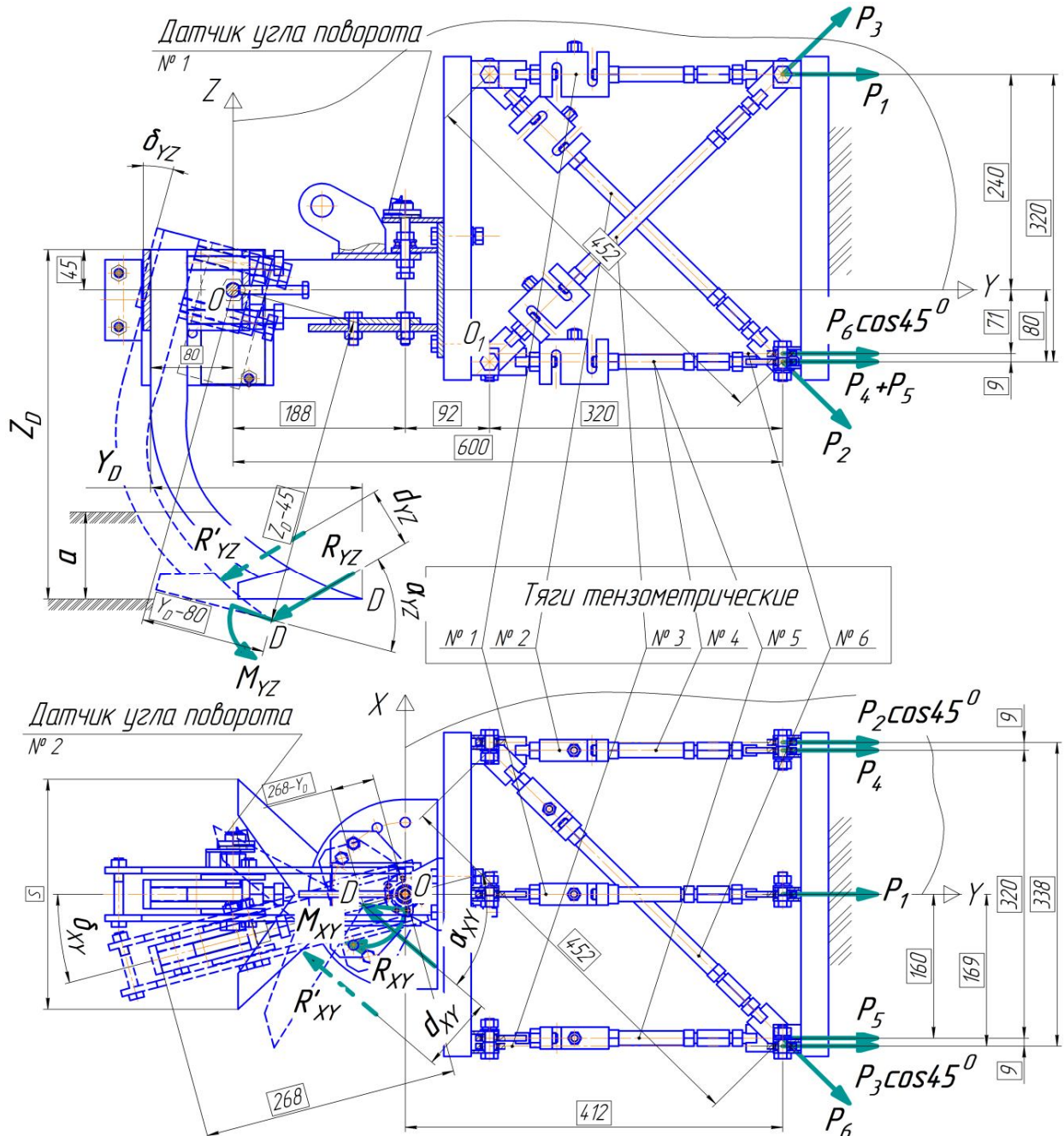


Рис. 1. Схемы нагружения навесного оборудования в продольно-вертикальной YZ (а) и в горизонтальной XY (б) плоскостях

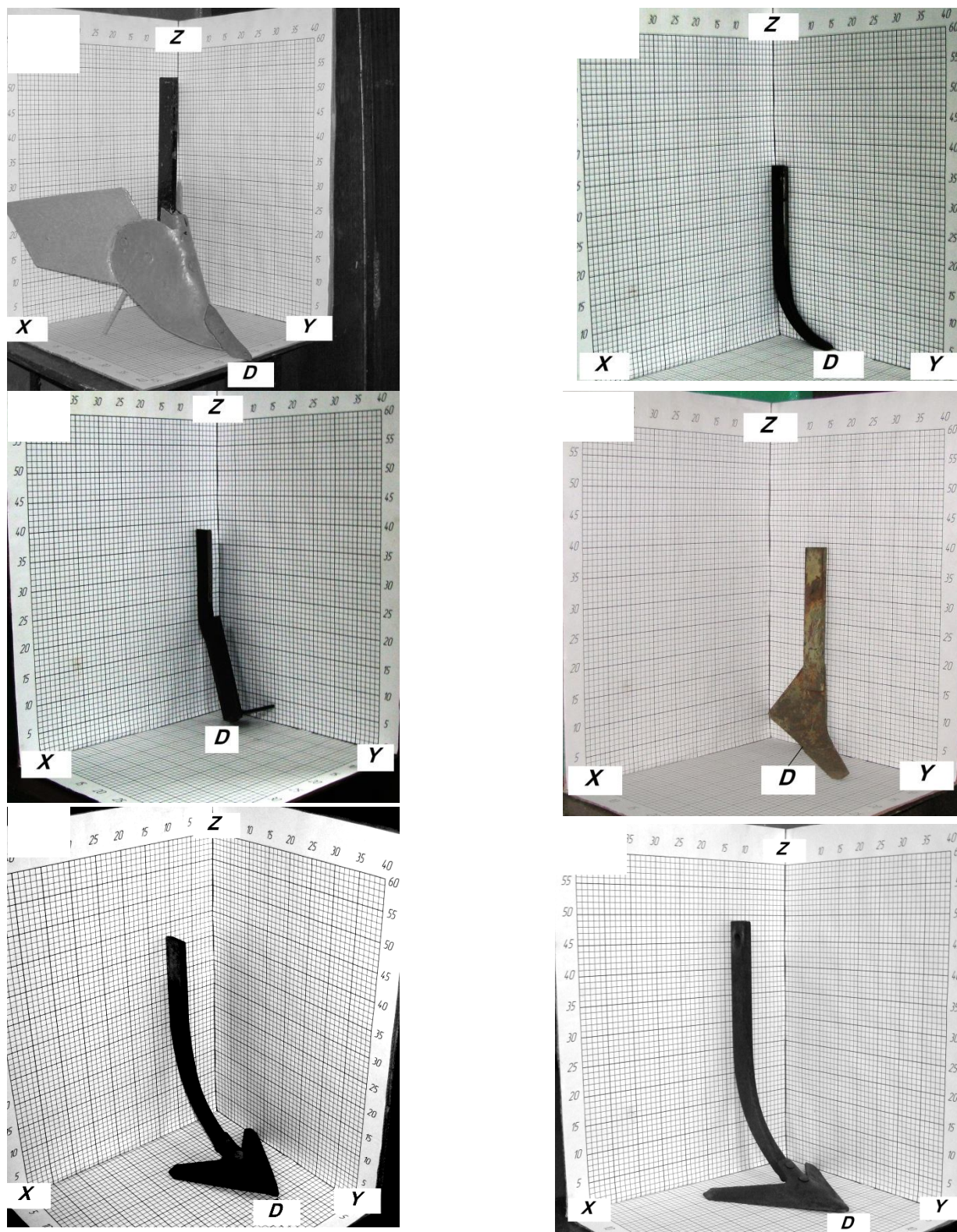


Рис. 2. Почвообрабатывающие рабочие органы
 01 – окучник № 01; 02 – лапа-долото № 02; 05 – нож черенковый № 05; 06 – лапа-бритва № 06;
 08 – лапа стрельчатая № 08; 09 – лапа стрельчатая № 09

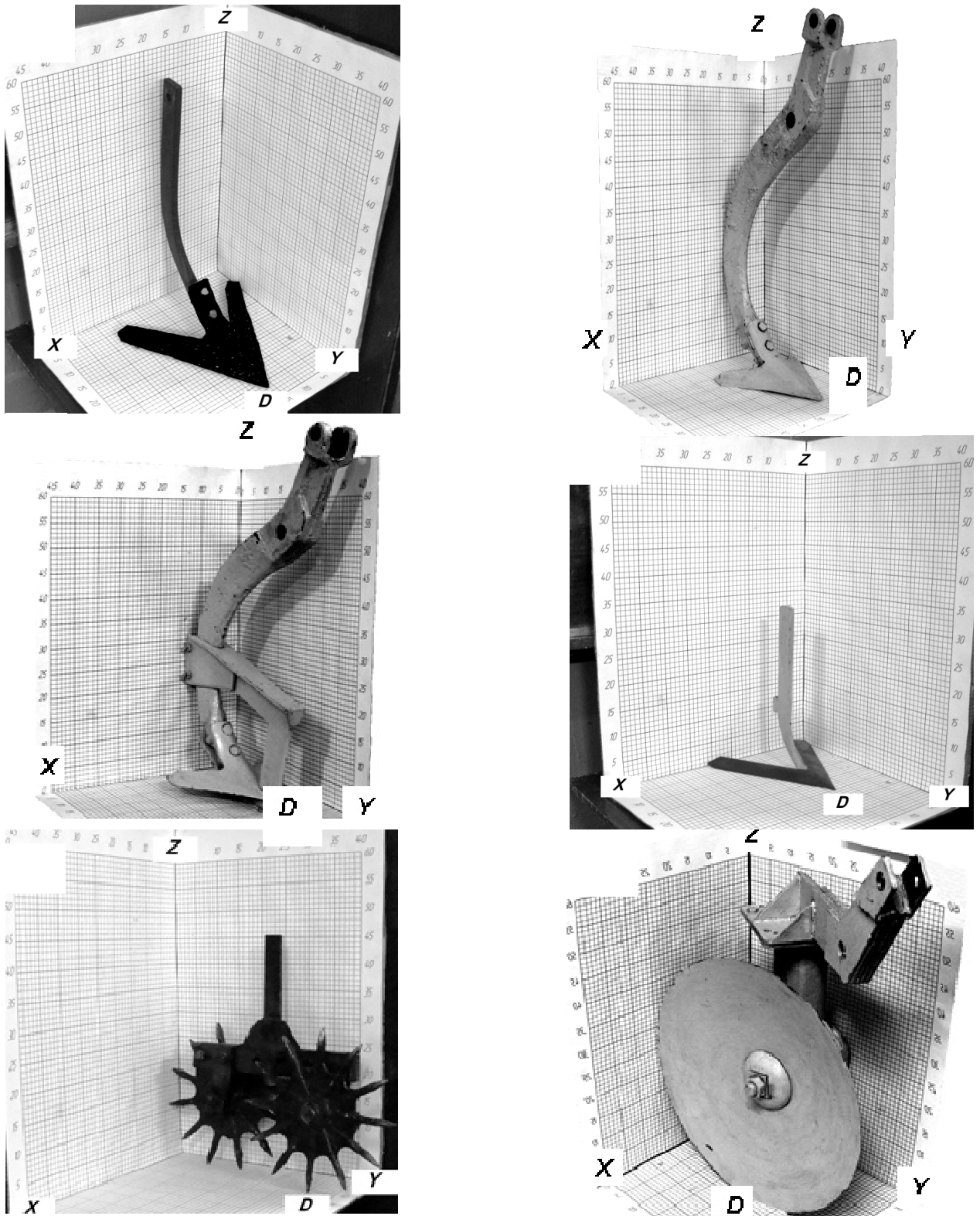


Рис. 3. Почвообрабатывающие рабочие органы (окончание)

10 – лапа стрельчатая № 10; 11 – лапа стрельчатая № 11; 12 – лапа стрельчатая с подрезным ножом № 12; 13 – лапа полольная № 13; 14 – рыхлитель № 14; 15 – диск сферический диаметром 510 мм № 15

Постоянные параметры рабочих органов

Название рабочего органа и идентификационный номер	Масса, кг	Геометрические параметры, см						Технологические параметры			
		l_Y	l_X	l_Z	X_D	Y_D	Z_D	a_n , см	R_Y , Н	δ'_{XY} , град.	δ'_{YZ} , град.
Окучник № 01	8,47	46	50	59	0	19	54	10	189	0	0
Лапа-долото № 02	1,41	15	2	35	0	15	35	10	76	0	0
Нож черенковый № 05	1,75	15	11	38	0	-3	38	10	125	0	0
Лапа-бритва № 06	1,77	30	15	39	0	5	39	10	133	0	0
Лапа стрельчатая № 08	3,37	20	22	42	0	31	42	12	167	0	0
Лапа стрельчатая № 09	3,81	24	27	49	0	30	49	12	284	0	0
Лапа стрельчатая № 10	5,08	31	33	53	0	37	53	15,5	461	0	0
Лапа стрельчатая № 11	15,2	31	24	70	0	10	70	10	151	0	0
Лапа стрельчатая с подрезным ножом № 12	18,18	10	33	70	0	10	70	10	230	0	0
Лапа полольная № 13	1,85	25,5	26	34	0	18	34	7	113	0	0
Рыхлитель № 14	10,59	20	22	42	0	31	42	12	134	0	0
Диск сферический диаметром 510 мм № 15	34,93	31	33	70	0	10	70	10	288	30	0

Таблица 3

Расчетные коэффициенты регрессий

Функция	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Окучник № 01									
R_{XY}/R_Y	0	0,1921	0,7267	0,8211	-0,697	-2,063	0,3512	2,67859	6,6748
α_{XY} , рад	0	0,1617	-0,005	-0,112	14,11	2,165	-0,822	-31,31	15,057
d_{XY}/l_0	0	0,2424	-4,795	-0,174	2,9468	13,523	-6,553	-38,559	25,79
R_{YZ}/R_Y	0	0,043	-1,8754	0,961	60,228	7,2121	-3,2784	-136,43	63,219
α_{YZ} , рад	0	0,1789	2,6913	-0,09	-12,711	-3,2496	1,5786	26,1034	-12,854
d_{YZ}/l_0	0	-0,1127	-4,0584	0,4076	73,52	2,1082	0,9229	-51,933	-4,3719
Лапа-долото № 02									
R_{XY}/R_Y	0	1,5157	1,6966	-0,4789	48,15	-4,9533	1,6613	-99,816	57,257
α_{XY} , рад	0	0,2672	-3,64	-0,2033	47,283	11,967	-6,2267	-112,15	62,29
d_{XY}/l_0	0	-0,5523	-13,93	0,2309	108,25	33,059	-16,111	-252,37	140,55
R_{YZ}/R_Y	0	1,2809	1,0788	-0,2799	42,241	-0,3009	0,3823	-108,78	52,499
α_{YZ} , рад	0	-0,4224	-0,7887	0,3788	5,8216	5,3093	-3,1698	-16,828	8,6705
d_{YZ}/l_0	0	-0,5259	4,1648	1,7075	120,24	-29,641	22,798	87,4786	-168,5
Нож черенковый № 05									
R_{XY}/R_Y	0	0,3865	-5,5715	0,6223	107,99	10,42	-3,5287	-178,69	62,805
α_{XY} , рад	0	0,1322	4,2342	-0,0867	-21,274	-5,8549	2,833	36,4852	-14,499
d_{XY}/l_0	0	-0,5666	5,273	0,2604	-77,393	-13,557	8,0292	148,002	-63,721
R_{YZ}/R_Y	0	0,434	-14,445	0,5694	113,76	26,031	-10,542	-201,22	67,791
α_{YZ} , рад	0	-0,1146	2,2604	0,0328	-18,914	-2,79	1,1712	28,5824	-10,155
d_{YZ}/l_0	0	-0,1191	-6,302	0,3365	197,62	0,9252	1,9654	-114,48	-0,4288
Лапа-бритва № 06									
R_{XY}/R_Y	0	0,7327	4,7761	0,3139	49,178	-8,7657	2,1876	-60,672	16,311
α_{XY} , рад	0	-0,2996	1,8068	0,0274	-1,9991	1,1513	-0,1573	11,1164	-1,0138
d_{XY}/l_0	0	-1,2849	-1,4925	0,4828	-39,473	7,3179	-2,7059	90,4103	-33,345
R_{YZ}/R_Y	0	0,9712	1,4147	0,0289	4,0123	-5,4029	2,9436	-0,8601	-4,4406
α_{YZ} , рад	0	-0,1297	1,6735	0,115	-18,667	-2,1597	1,417	36,7357	-18,365
d_{YZ}/l_0	0	0,1252	-5,4528	0,1759	106,99	6,9688	-1,7832	-105,81	19,614
Лапа стрельчатая № 08									
R_{XY}/R_Y	0	1,0826	-2,7388	-0,0808	30,228	6,054	-2,4497	-62,896	24,748
α_{XY} , рад	0	0,0599	0,6729	-0,0349	2,3355	0,5973	-0,1621	-2,083	0,6445

Технологии. Машины и оборудование

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_{xy}/l_0	0	0,1502	-1,1005	-0,0972	9,5957	2,705	-0,6985	-9,5235	2,5623
R_{yz}/R_y	0	1,1516	-2,0524	-0,1178	36,87	5,9189	-1,7172	-79,348	35,719
α_{yz} , рад	0	0,3291	3,4856	-0,0727	-14,315	-2,52	0,6486	14,0934	-4,3907
d_{yz}/l_0	0	0,2725	-3,7946	0,148	96,054	0,4118	1,1506	-55,34	-4,6545
Лапа стрельчатая № 09									
R_{xy}/R_y	0	0,8966	-2,3077	0,1038	29,628	4,6666	-2,6097	-63,807	29,921
α_{xy} , рад	0	0,0285	0,3938	-0,0348	5,3796	1,8083	-0,8042	-11,665	5,4626
d_{xy}/l_0	0	-0,0873	-1,7175	-0,0004	14,3	5,3327	-2,0872	-22,804	9,1513
R_{yz}/R_y	0	0,6766	0,525	0,3753	19,841	-1,4401	2,5575	-25,918	1,0923
α_{yz} , рад	0	0,549	2,4384	-0,2335	-2,3888	-1,4796	0,1208	-6,9025	6,4466
d_{yz}/l_0	0	0,3435	-3,1396	0,0359	72,216	1,0132	1,1388	-61,994	5,3079
Лапа стрельчатая № 10									
R_{xy}/R_y	0	0,6102	-4,0011	0,3908	26,461	10,915	-6,7376	-71,679	44,253
α_{xy} , рад	0	-0,0446	1,6986	0,0057	0,0992	-1,2629	0,8663	0,98227	-1,5633
d_{xy}/l_0	0	-0,3828	1,6291	0,2159	-11,467	-1,68	1,5884	32,5536	-20,825
R_{yz}/R_y	0	0,6108	-0,742	0,4646	13,905	2,8337	0,0519	-27,776	0,6108
α_{yz} , рад	0	0,8496	0,4554	-0,4729	12,268	2,1629	-1,6952	-42,024	0,8496
d_{yz}/l_0	0	0,2866	-3,9251	0,1279	54,6	6,3669	-2,2611	-68,725	0,2866
Лапа стрельчатая № 11									
R_{xy}/R_y	0	0,4761	-2,6887	0,5448	27,607	7,5817	-3,7393	-63,927	24,938
α_{xy} , рад	0	0,2024	-0,7135	-0,1568	23,56	3,6784	-1,7474	-46,697	21,566
d_{xy}/l_0	0	-0,95	1,5186	0,5931	-39,235	-1,7403	1,1618	80,3004	-41,484
R_{yz}/R_y	0	0,5486	-2,4959	0,5537	18,024	-4,6175	4,1566	-13,119	-10,184
α_{yz} , рад	0	0,8132	-3,4823	-0,3791	-19,266	7,5309	-3,2614	21,1841	-8,312
d_{yz}/l_0	0	-0,5545	12,3	0,7526	241,13	-23,124	10,927	-317,96	106,68
Лапа стрельчатая с подрезным ножом № 12									
R_{xy}/R_y	0	0,8221	7,4611	0,2047	-32,727	-13,251	5,5851	50,3162	-19,162
α_{xy} , рад	0	0,2288	-0,6491	-0,15	20,762	3,9554	-1,6028	-46,421	22,793
d_{xy}/l_0	0	0,0358	8,7272	0,0622	-106,18	-7,2787	4,5453	183,245	-78,957
R_{yz}/R_y	0	0,5531	0,7311	0,447	16,013	-5,7063	2,5619	-22,055	-1,677
α_{yz} , рад	0	-0,1881	0,5443	0,1729	-9,466	-2,2152	1,6554	29,362	-17,091
d_{yz}/l_0	0	1,6388	38,393	0,1772	560,87	-63,413	29,469	-713,82	219,21
Лапа полостьная № 13									
R_{xy}/R_y	0	1,5041	-4,5593	-0,4795	65,65	9,369	-4,2063	-143,56	65,446
α_{xy} , рад	0	0,2196	-1,1074	-0,1309	14,767	4,1971	-1,822	-28,851	13,522
d_{xy}/l_0	0	-0,0955	-0,2424	0,0138	-4,2062	-0,1465	0,692	15,5093	-8,0403
R_{yz}/R_y	0	1,3061	-0,0134	-0,3	21,875	-2,2209	1,657	-47,158	20,035
α_{yz} , рад	0	0,0569	0,6703	0,0529	-6,7329	4,4208	-1,854	-9,0436	4,3518
d_{yz}/l_0	0	0,2441	-4,488	0,2134	94,183	9,2762	-3,1146	-116,2	26,474
Рыхлитель № 14									
R_{xy}/R_y	0	0,8578	-4,7002	0,1816	114,94	16,365	-14,308	-363,97	282,01
α_{xy} , рад	0	0,2762	-3,0839	-0,4813	49,128	13,123	-5,3843	-127,6	81,412
d_{xy}/l_0	0	-0,6124	-19,64	-0,4602	157,87	65,496	-31,403	-424,73	280,01
R_{yz}/R_y	0	0,3394	0,4335	1,1285	35,532	-4,4279	1,2647	-98,355	75,821
α_{yz} , рад	0	-1,4438	0,5398	0,6225	30,43	3,28	-2,2627	-63,224	27,703
d_{yz}/l_0	0	0,5394	-9,5837	-0,8086	293,97	34,14	-19,157	-610,28	299,86
Диск сферический диаметром 510 мм № 15									
R_{xy}/R_y	0	-5,3547	4,6518	4,9631	-13,164	14,264	-15,876	4,13409	8,8618
α_{xy} , рад	0	-1,9419	-0,3333	-0,1942	4,0682	9,4857	-0,0553	-16,717	3,4011
d_{xy}/l_0	0	-1,5583	-7,1153	-2,4539	10,138	12,653	7,8831	-23,733	-3,2457
R_{yz}/R_y	0	0,9657	16,069	0,0349	-22,806	-35,261	18,633	30,4001	-12,209
α_{yz} , рад	0	0,794	16,009	-0,7578	-41,056	-20,507	7,5436	47,2465	-17,194
d_{yz}/l_0	0	-1,4362	22,968	0,8189	-61,375	-21,524	6,3469	105,805	-42,794

Библиографический список

1. Гячев, Л. В. Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов [Текст] / Л. В. Гячев. – М. : Машиностроение, 1981. – 206 с.
2. Донцов, И. Е. Математическая модель вынужденных колебаний комбинированных МТА [Текст] / И. Е. Донцов, И. М. Бартнев // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2010. – № 6. – С. 129-135.
3. ПатентRU 2498245 С1, МПК G01L 5/13. Установка для объемного тензометрирования [Текст] / И. М. Бартнев, М. Н. Лысыч, И. Е. Донцов (РФ). – № 2012118290/28 ; заяв. 03.05.2012 : опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31. – 5 с.
4. Al-Jalil, H. F. Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer [Text] / H. F. Al-Jalil, A. Khdaif, W. Mukahal // Soil and Tillage Research. – 2001. – Vol. 62. – Issues 3-4. – P. 153-156.
5. A novel approach to the prediction of tillage tool draught using a standard tine [Text] / J. M. A. Desbiolles, R. J. Godwin, J. Kilgour, B. S. Blackmore // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1997. – Volume 66. – Issue 4. – P. 295-309.
6. Ghemraoui, R. Design method for systematic safety integration [Text] / R. Ghemraoui, L. Mathieu, N. Tricot // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 58. – Issue 1. – P. 161-164.
7. Jönsson, H. Return from a Lateral Displacement by Front-Mounted Three-Point Hitched Implements [Text] / H. Jönsson, R. Bengtsson // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1998. – Vol. 69. – Issue 3. – P. 199-208.
8. Electro-hydraulic tillage depth control system for rotary implements mounted on agricultural tractor. Design and response experiments of control system [Text] / J. Lee, M. Yamazaki, A. Oida, H. Nakashima, H. Shimizu // Journal of Terramechanics. – 1998. – Vol. 35. – Issue 4. – P. 229-238.
9. Palmer, A. L. Development of a three-point-linkage dynamometer for tillage research [Text] / A. L. Palmer // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1992. – Vol. 52. – P. 157-167.
10. Thompson, R. G. The influence of front linkage geometry on tractor-implement interaction [Text] / R. G. Thompson, P. A. Cowell // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1990. – Vol. 45. – P. 175-186.

References

1. Gyachev L.V. *Ustoychivost' dvizheniya sel'skokhozyaystvennykh mashin i agregatov* [The stability of the agricultural machinery and tractor units motion]. Moscow, 1981, 206 p. (In Russian).
2. Doncov I.E., Bartnev I.M. *Matematicheskaja model' vynuzhdennyh kolebanij kombinirovannykh MTA* [Mathematical model of forced oscillations combined tractor units motion]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik* [Bulletin of Moscow State Forest University - Forest Bulletin]. 2010, no. 6, pp. 129-135. (In Russian).
3. Bartnev I.M., Lysych M.N., Dontsov I.E. *Ustanovka dlya obyemnoho tenzometrirovaniya* [Installation for volumetric strain measurement] Patent RF no. 2498245.
4. Al-Jalil H. F., Khdaif A., Mukahal W. Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer. *Soil and Tillage Research*, November 2001, Vol. 62, Issues 3-4, pp. 153-156.
5. Desbiolles J.M.A., Godwin R.J., Kilgour J., Blackmore B.S.. A novel approach to the prediction of tillage tool draught using a standard tine. *Journal of Agricultural Engineering Research*, April 1997, Vol. 66, Issue 4, pp. 295-309.
6. Ghemraoui R., Mathieu L., Tricot N. Design method for systematic safety integration. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009, Vol. 58, Issue 1, pp. 161-164.
7. Jönsson H., Bengtsson R. Return from a Lateral Displacement by Front-Mounted Three-Point Hitched Implements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, March 1998, Vol. 69, Issue 3, pp. 199-208.
8. Lee J., Yamazaki M., Oida A., Nakashima H., Shimizu H. Electro-hydraulic tillage depth control system for rotary implements mounted on agricultural tractor. Design and response experiments of control system. *Journal of*

Terramechanics, December 1998, Vol. 35, Issue 4, pp. 229-238.

9. Palmer A.L. Development of a three-point-linkage dynamometer for tillage research. Journal of Agricultural Engineering Research, May-August 1992, Vol. 52, pp. 157-167.

10. Thompson R.G., Cowell P.A. The influence of front linkage geometry on tractor-implement interaction. Journal of Agricultural Engineering Research, January-April 1990, Vol. 45, pp. 175-186.

Сведения об авторах

Донцов Игорь Евгеньевич – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: dontsovie@mail.ru.

Лысыч Михаил Николаевич – ст. преп. кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: miklynea@yandex.ru.

Шабанов Михаил Леонидович – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Information about authors

Dontsov Igor' Evgen'evich – Associate Professor of Forestry Mechanization and Machine Design department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», PhD in Engineering, Voronezh, Russian Federation; e-mail: dontsovie@mail.ru.

Lysych Mikhail Nikolaevich – Senior Lecturer of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Ph.D. in Engineering, Voronezh, Russian Federation; e-mail: miklynea@yandex.ru.

Shabanov Michael Leonidovich – Associate Professor of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Ph.D. in Engineering, Voronezh, Russian Federation; e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.