

# АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

Оригинальная статья / Original article

УДК 631.316.022

doi: 10.15507/2658-4123.034.202402.213-228



## Обоснование оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора по тяговому сопротивлению

И. В. Божко<sup>1</sup>✉, С. И. Камбулов<sup>1,2</sup>, Г. Г. Пархоменко<sup>1</sup>,  
В. Б. Рыков<sup>1,2</sup>, Д. С. Подлесный<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Аграрный научный центр «Донской»

(г. Зерноград, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Донской государственный технический университет

(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

✉ [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Технологическая операция обработки почвы является энергоемким процессом. Непосредственное влияние на показатель энергозатрат оказывает тяговое сопротивление почвообрабатывающих агрегатов. В связи с этим актуальной является задача разработки конструкции рабочего органа парового культиватора, обеспечивающего снижение тягового сопротивления.

**Цель исследования.** Поиск оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора путем определения тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось в полевых условиях на опытной установке с применением метода полного факторного эксперимента с рабочей моделью, основанной на трехуровневом плане.

**Результаты исследования.** Посредством регрессионного анализа экспериментальных данных была получена математическая модель, позволяющая определить оптимальные параметры функционирования рабочего органа парового культиватора при выполнении технологической операции обработки почвы.

**Обсуждение и заключение.** В ходе расчетов было установлено, что наименьшее тяговое сопротивление  $P_t = 0,72$  кН, создаваемое рабочим органом, достигается при следующих значениях: глубина обработки почвы  $h = 4$  см; угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев  $f = 0^\circ$ ; скорость движения агрегата  $v = 2,61$  м/с. В качестве оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора, определенных при помощи полученной математической модели, угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рекомендуется принять как  $f = 0^\circ$ , а скорость движения агрегата как  $v = 2,91$  м/с. Также, учитывая рекомендуемые оптимальные параметры рабочего органа, возможно рассчитать значение показателя тягового сопротивления при различной глубине обработки почвы. Тяговое сопротивление будет изменяться в пределах 0,79–1,81 кН при глубине обработки почвы от 4 до 12 см.

© Божко И. В., Камбулов С. И., Пархоменко Г. Г., Рыков В. Б., Подлесный Д. С., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Полученная математическая модель тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом, позволит более точно подходить к вопросу проектирования сельскохозяйственных машин.

**Ключевые слова:** параметры функционирования, тяговое сопротивление, паровой культиватор, математическая модель, регрессионный анализ

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках госбюджетной НИР.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

**Для цитирования:** Обоснование оптимальных параметров функционирования рабочего органа парового культиватора по тяговому сопротивлению / И. В. Божко [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 213–228. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.213-228>

## Justification of Optimal Operating Parameters of the Field Cultivator Tool through Determining Traction Resistance

I. V. Bozhko<sup>a</sup>✉, S. I. Kambulov<sup>a,b</sup>, G. G. Parkhomenko<sup>a</sup>,  
V. B. Rykov<sup>a,b</sup>, D. S. Podlesny<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Agrarian Research Center Donskoy  
(Zernograd, Russian Federation)

<sup>b</sup> Don State Technical University  
(Rostov-on-Don, Russian Federation)

✉ [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** The technological operation of soil tillage is an energy-intensive preparatory operation. The traction resistance of tillage units has a direct impact on this indicator.

**Aim of the Study.** The study is aimed at searching optimal operating parameters for the field cultivator tool through determining the traction resistance created by this tool.

**Materials and Methods.** The study was carried out in the field on an experimental facility using a full factorial experiment technique with a working model based on a three-level design.

**Results.** Through the regression analysis of experimental data, there was obtained a mathematical model that allows determining the optimal operating parameters for the field cultivator tool when performing a technological operation of soil tillage.

**Discussion and Conclusion.** While calculating, it was found that the lowest traction resistance  $P_T = 0,72$  kN created by the tool is for the following values: tillage depth  $h = 4$  cm, crumbling angle of the left-hand and right-hand flat-cutting wings  $f = 0^\circ$  and the speed of the tillage unit  $v = 2,61$  m/s. As the optimal operating parameters for a field cultivator tool, determined using the obtained mathematical model, it is recommended to use the crumbling angle of the left-hand and right-hand flat-cutting wings of the working body  $f = 0^\circ$ , and the speed of the tillage unit  $v = 2,91$  m/s. Taking into account the recommended optimal operating parameters of the tool, it is possible to calculate the value of the traction resistance index at different tillage depths. The traction resistance will change within the range of 0.79–1.81 kN, when the soil tillage depth changes from 4 to 12 cm. The resulting mathematical model of the traction resistance created by the tool will allow a more accurate approach to the issue of designing agricultural machines.

**Keywords:** optimal operating parameters, traction resistance, field cultivator tool, mathematical model, regression analysis

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

**Funding:** The study was carried out as part of the state budget research.

**Acknowledgements:** The authors would like to thank anonymous reviewers.

**For citation:** Bozhko I.V., Kambulov S.I., Parkhomenko G.G., Rykov V.B., Podlesny D.S. Justification of Optimal Operating Parameters of the Field Cultivator Tool through Determining Traction Resistance. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):213–228. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.213-228>

**Введение.** При проектировании рабочих органов сельскохозяйственных машин одной из основных величин является тяговое сопротивление, создаваемое при различных параметрах и режимах функционирования агрегата. Тяговое сопротивление машин для обработки почвы представляет собой числовое значение затрат энергии трактора на выполнение данной технологической операции.

На энергопотребление и качество выполняемых операций напрямую влияет устойчивость почвы к деформации. С одной стороны, параметрами, влияющими на сопротивление деформации почвы, являются ее механические и структурные характеристики (влажность, твердость, плотность), с другой – это геометрические параметры рабочих органов (форма и качество рабочих поверхностей), а также вес агрегата.

Современные сельскохозяйственные агрегаты для сплошной обработки почвы, выпускаемые серийно, оснащаются рабочими органами в виде стрелчатых лап. Такой тип обладает рядом недостатков, среди которых отсутствие возможности обработки почвы на небольшую глубину (4–6 см) без выноса почвенной влаги на поверхность. Небольшая ширина захвата рабочих органов ведет к увеличению их количества, что повышает металлоемкость и энергозатраты, необходимые для осуществления технологической операции обработки почвы.

В связи с этим работа, направленная на создание конструкции рабочего органа культиватора, имеющего функцию выполнения обработки почвы на глубину 4–6 см без выноса влаги из почвенных слоев на поверхность и обеспечивающего снижение тягового сопротивления, своевременна и актуальна.

**Обзор литературы.** В настоящее время изучению вопроса энергетических затрат при выполнении технологической операции обработки почвы уделяется большое внимание, и процесс этот достаточно полно изучен. Так, в исследовании Е. В. Припорова приведены энергетические показатели работы культиватора в зависимости от размещения рабочих органов на раме в продольном и поперечном направлении [1]. Ученые Омского аграрного университета при выявлении конструктивных недостатков рабочих органов культиваторов установили, что основной причиной некачественной работы агрегата является образование борозд и гребней вследствие разброса почвы по сторонам и ее сгуживания, а также из-за залипания рабочих органов. В результате ими предложена конструкция рабочего органа для сплошной обработки почвы, решающая данную проблему [2].

Современные экспериментальные исследования направлены на создание рабочих органов с регулируемыми параметрами. Например, П. Г. Свечниковым установлено, что затраты энергии на раскалывание и разрезание почвенного пласта рабочими органами связаны с изменением угла крошения, задаваемого во время проектирования конструкции рабочих органов [3]. В исследовании С. И. Старовойтова в рамках этой же проблемы предложена конструкция стрелчатой лапы с возможностью изменения угла резания почвы, а также выражение для определения горизонтальной составляющей тягового сопротивления [4].

Также на данном этапе развития вопроса ученые рассматривают зависимости удельных затрат энергии от скорости движения и глубины обработки почвы комбинированным культиватором. Доказано, что показатель тягового сопротивления растет с увеличением глубины обработки почвы [5].

С целью разработки энергоэффективных почвообрабатывающих рабочих органов приведена классификация условий их функционирования и обоснованы рациональные конструктивные параметры [6]. Рассчитаны дифференциальные уравнения, учитывающие расположение рабочих органов на раме агрегата, и возмущения, возникающие вследствие неровностей поверхности поля и неравномерности энергетических характеристик рабочих органов [7].

В ходе опытов с использованием компьютерной модели деформации почвы получены характеристики процессов взаимодействия рабочих органов сельскохозяйственных машин с почвой [8]. С применением компьютерного моделирования изучены различные типы конструкций рабочих органов культиваторов и их взаимодействие с разными типами почв [9–11]. Установлено, что обработка почвы паровых полей, особенно в засушливый период [12], позволяет накапливать больше влаги [13] в почвенных слоях и получать более высокие урожаи зерновых культур [14; 15].

Интерес ученых вызывает оптимизация параметров и режимов функционирования почвообрабатывающих агрегатов с применением цифровых технологий. Так, Г. Г. Маслов, Е. М. Юдина и И. А. Журий представили алгоритм оптимальных режимов и параметров работы стернового культиватора в виде блок-схемы [16]. В настоящее время ведется изучение и разработка культиваторов различной ширины захвата для сплошной обработки почвы с применением теории случайных колебаний [17].

С использованием методики многофакторного эксперимента исследуется влияние удельного вертикального и горизонтального тягового сопротивления сельскохозяйственных машин и коэффициент тягового усилия в зависимости от глубины обработки и скорости движения [18]. Кроме того, предлагается многометодный алгоритм определения энергетических затрат почвообрабатывающих машин без учета массы рамы и вспомогательных элементов агрегата (опорных колес и др.) [19].

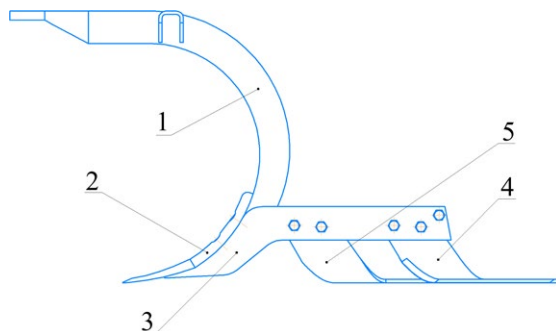
Отмечается, что при определении тягового сопротивления культиваторов-плоскорезов на долю стоек приходится 30–45 % общих затрат энергии<sup>1</sup>.

Таким образом, технологический процесс обработки почвы паровых полей, выполняемый рабочими органами культиватора, является важной операцией,

<sup>1</sup> Камбулов С. И. Механико-технологические основы повышения уровня функционирования сельскохозяйственных агрегатов : моногр. Ростов-на-Дону : Терра Принт, 2006. 304 с. EDN: [RVPRIL](#)

оказывающей непосредственное влияние на энергоемкость и производительность сельскохозяйственной техники. Параметры рабочих органов нуждаются в оптимизации, чему посвящено настоящее исследование.

**Материалы и методы.** В Аграрном научном центре «Донской» разработан рабочий орган парового культиватора для сплошной обработки почвы (рис. 1 и 2).



Р и с. 1. Рабочий орган парового культиватора для сплошной обработки почвы:  
1 – стойка рабочего органа; 2 – долотообразный нож; 3 – съемный держатель;  
4 – левостороннее плоскорежущее крыло; 5 – правостороннее плоскорежущее крыло

F i g. 1. A field cultivator tool for continuous tillage:  
1 – rack of the working body; 2 – chisel-shaped knife; 3 – removable holder;  
4 – left-side flat-cutting wing; 5 – right-hand flat-cutting wing

*Источник:* схема составлена авторами статьи.

*Source:* the diagram was drawn up by the authors of the article.



Р и с. 2. Рабочий орган парового культиватора для сплошной обработки почвы.  
Автор фотографии И. В. Божко, 2023 г.

F i g. 2. Field cultivator tool for continuous soil tillage.  
The photo by I. V. Bozhko, 2023



Конструкция рабочего органа парового культиватора выполнена с возможностью регулировки угла крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев в диапазоне  $0-10^\circ$  для установления оптимальных параметров его функционирования.

Методика экспериментальных исследований по определению тягового сопротивления основана на планировании полного факторного эксперимента<sup>2</sup>. В качестве рабочей модели был выбран трехуровневый план Бокса – Бенкина<sup>3</sup>. На данном этапе экспериментальных исследований были приняты параметры: глубина обработки почвы рабочим органом, угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа, скорость движения агрегата.

Исследования проводились в полевых условиях на экспериментальной установке. В качестве измерительного оборудования использовалась многоканальная тензометрическая система ZET 058 (рис. 3) производства Зеленоградской электротехнической лаборатории и тензодатчик силы растяжения и сжатия ТЕНЗО-М С2Н-2-С3 (рис. 4), установленный в шарнирном механизме экспериментальной установки по тяговой линии (рис. 3 и 4).



Р и с. 3. Многоканальная тензометрическая система ZET 058. Автор фотографии И. В. Божко, 2023 г.

F i g. 3. Multichannel strain gauge system ZET 058.  
The photo by I. V. Bozhko, 2023



Р и с. 4. Тензодатчик силы растяжения и сжатия ТЕНЗО-М С2Н-2-С3. Автор фотографии И. В. Божко, 2023 г.

F i g. 4. Strain gauge of tensile and compression force TENZO-M S2N-2-S3. The photo by I. V. Bozhko, 2023

Для обработки полученных данных использовалось программное обеспечение ZETLab, среда графического программирования SCADA ZETView, программа для проведения исследований показателей тягового сопротивления, разработанная посредством применения среды графического программирования SCADA ZETView, Microsoft Excel и STATISTICA.

<sup>2</sup> Доспехов Б. А. Методика полевого опыта : учебник для студентов высших сельскохозяйственных учебных заведений по агрономическим специальностям. Изд. 6-е, стер. М. : Альянс, 2011. 350 с.

<sup>3</sup> Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий : моногр. М. : Наука, 1976. 280 с. EDN: [TOBZDM](#)

Согласно плану эксперимента, на опытной установке определялась глубина обработки почвы, на рабочем органе устанавливался угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев, а на мобильном энергосредстве (МЭС) задавалась скорость движения агрегата. В качестве МЭС использовался трактор TERRION ATM 3180М 3-го класса тяги агрегатируемый с экспериментальной установкой (рис. 5).



Р и с. 5. Трактор TERRION ATM 3180М в агрегате с экспериментальной установкой.  
Автор фотографии И. В. Божко, 2023 г.

F i g. 5. Tractor TERRION ATM 3180 in a unit with an experimental facility.  
The photo by I. V. Bozhko, 2023

На паровом поле размечены экспериментальные участки для проведения исследований по определению тягового сопротивления рабочего органа парового культиватора. Каждый участок разделили на три части: 20 м – для выхода на устойчивый режим работы трактора и его разворота, 50 м – экспериментальный участок, на котором производилась фиксация показателей тензодатчика. Фиксация показателей производилась в трех повторностях при различных параметрах, задаваемых на экспериментальной установке, рабочем органе и мобильном энергосредстве. Обозначения факторов представим в виде таблицы 1.

Т а б л и ц а 1  
Table 1

Обозначения факторов  
Factors Designation

| Наименование фактора и обозначения /<br>Factor name and designation                                                                                                   | Кодированное<br>обозначение<br>фактора /<br>Coded factor<br>designation | Уровни<br>варьирования /<br>Variation levels |      |      | Интервал<br>варьирования<br>фактора /<br>Factor<br>variation<br>interval |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------|------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                       |                                                                         | –1                                           | 0    | +1   |                                                                          |
| Глубина обработки почвы рабочим органом<br>$h$ , см / Depth of tillage with working body $h$ , cm                                                                     | $X_1$                                                                   | 4                                            | 6    | 8    | 2                                                                        |
| Угол крошения левостороннего и правостороннего<br>плоскорежущих крыльев $f$ , град. / Angle of crumbling<br>of left-hand and right-hand flat-cutting wings $f$ , deg. | $X_2$                                                                   | 0                                            | 5    | 10   | 5                                                                        |
| Скорость движения агрегата $v$ , м/с / Unit movement<br>speed $v$ , m/s                                                                                               | $X_3$                                                                   | 2,21                                         | 2,91 | 3,61 | 0,70                                                                     |

Источник: здесь и далее в статье все таблицы составлены авторами.

Source: hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

В соответствии с рабочей моделью и трехуровневым планом экспериментальных исследований перед началом эксперимента значения факторов были приведены к безразмерным величинам (кодировались).

**Результаты исследования.** В результате проведения исследований получены числовые значения тягового сопротивления создаваемого рабочим органом парового культиватора. Значения тягового сопротивления в зависимости от выбранных факторов представим в виде таблицы 2.

Т а б л и ц а 2  
Table 2

Матрица планирования эксперимента и результаты исследований  
Experiment planning matrix and research results

| № опыта /<br>Experience no. | Значения факторов<br>в закодированном виде / Factor<br>values in an encoded form |       |       | Значения факторов<br>в натуральном виде / Factor<br>values in a natural form |                             |                          | Тяговое<br>сопротивление,<br>$P_T$ , кН / Traction<br>resistance, $P_T$ , kN |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                             | $X_1$                                                                            | $X_2$ | $X_3$ | $h$ , см /<br>$h$ , cm                                                       | $f$ , град. /<br>$f$ , deg. | $v$ , м/с /<br>$v$ , m/s |                                                                              |
| 1                           | +1                                                                               | +1    | 0     | 8                                                                            | 10                          | 2,91                     | 2,01                                                                         |
| 2                           | –1                                                                               | 0     | +1    | 4                                                                            | 5                           | 3,61                     | 1,83                                                                         |
| 3                           | –1                                                                               | 0     | –1    | 4                                                                            | 5                           | 2,21                     | 1,45                                                                         |
| 4                           | 0                                                                                | 0     | 0     | 6                                                                            | 5                           | 2,91                     | 1,31                                                                         |
| 5                           | –1                                                                               | +1    | 0     | 4                                                                            | 10                          | 2,91                     | 0,98                                                                         |
| 6                           | 0                                                                                | +1    | –1    | 6                                                                            | 10                          | 2,21                     | 1,71                                                                         |
| 7                           | 0                                                                                | –1    | +1    | 6                                                                            | 0                           | 3,61                     | 1,38                                                                         |
| 8                           | –1                                                                               | –1    | 0     | 4                                                                            | 0                           | 2,91                     | 0,73                                                                         |
| 9                           | 0                                                                                | 0     | 0     | 6                                                                            | 5                           | 2,91                     | 1,32                                                                         |
| 10                          | +1                                                                               | 0     | +1    | 8                                                                            | 5                           | 3,61                     | 1,94                                                                         |
| 11                          | +1                                                                               | 0     | –1    | 8                                                                            | 5                           | 2,21                     | 1,83                                                                         |
| 12                          | 0                                                                                | 0     | 0     | 6                                                                            | 5                           | 2,91                     | 1,33                                                                         |
| 13                          | 0                                                                                | –1    | –1    | 6                                                                            | 0                           | 2,21                     | 0,80                                                                         |
| 14                          | +1                                                                               | –1    | 0     | 8                                                                            | 0                           | 2,91                     | 1,11                                                                         |
| 15                          | 0                                                                                | +1    | +1    | 6                                                                            | 10                          | 3,61                     | 1,99                                                                         |



Выражение математической модели с учетом взаимодействия факторов запишем в виде полинома второй степени:

$$y = b_0X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2. \quad (1)$$

Дальнейшая обработка результатов исследований заключается в определении значимости коэффициентов математической модели. Для этого воспользуемся критерием Стьюдента при 5-процентном уровне значимости.

Результаты расчетов значений коэффициентов математической модели и проверки их значимости представим в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

Table 3

**Результаты расчетов значений коэффициентов математической модели и проверки их значимости по критерию Стьюдента**

**Results of calculating the values of the coefficients of the mathematical model coefficients and checking their significance using the Student's test**

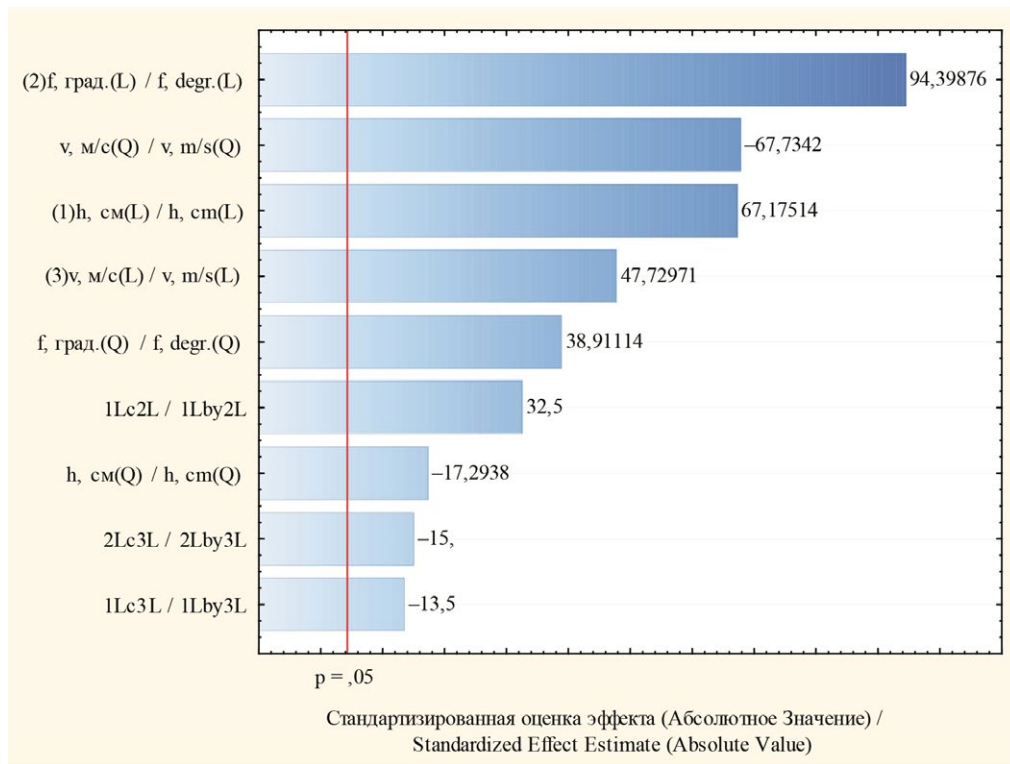
| Коэффициент математической модели /<br>Mathematical model coefficient | Значение коэффициента математической модели в закодированном виде /<br>Mathematical model coefficient value in encoded form | Рассчитанное значение по критерию Стьюдента, $t$ /<br>Calculated value based on criterion Student's test, $t$ | Табличное значение по критерию Стьюдента, $t_{кр}$ /<br>Tabular value by Student's criterion, $t_{cr}$ |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $b_0$                                                                 | 1,4800                                                                                                                      | 512,6870                                                                                                      | 2,16                                                                                                   |
| $b_1$                                                                 | 0,2375                                                                                                                      | 67,1751                                                                                                       |                                                                                                        |
| $b_{11}$                                                              | -0,0450                                                                                                                     | -17,2938                                                                                                      |                                                                                                        |
| $b_2$                                                                 | 0,3337                                                                                                                      | 94,3988                                                                                                       |                                                                                                        |
| $b_{22}$                                                              | 0,1012                                                                                                                      | 38,9111                                                                                                       |                                                                                                        |
| $b_3$                                                                 | 0,1687                                                                                                                      | 47,7297                                                                                                       |                                                                                                        |
| $b_{33}$                                                              | -0,1762                                                                                                                     | -67,7342                                                                                                      |                                                                                                        |
| $b_{12}$                                                              | 0,1625                                                                                                                      | 32,5000                                                                                                       |                                                                                                        |
| $b_{13}$                                                              | -0,0675                                                                                                                     | -13,5000                                                                                                      |                                                                                                        |
| $b_{23}$                                                              | -0,0750                                                                                                                     | -15,0000                                                                                                      |                                                                                                        |

Анализ данных рассчитанных значений показал, что все коэффициенты в рассматриваемой математической модели являются значимыми, так как они больше табличного (критическое значение – квантиль). Число значимых коэффициентов при этом равно 9.

Для более полного анализа представим данные таблицы 3 в виде гистограммы Парето (рис. 6).

Как видно из гистограммы Парето, наиболее значимым фактором, оказывающим воздействие на создаваемое рабочим органом парового культиватора тяговое сопротивление, является фактор угла крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев. Математическая модель в закодированном виде будет выглядеть следующим образом:

$$y = 1,4800 + 0,2375X_1 + 0,3337X_2 + 0,1687X_3 + 0,1625X_{12} - 0,0675X_{13} - 0,0750X_{23} - 0,450X_1^2 + 0,1012X_2^2 - 0,1762X_3^2. \quad (2)$$



Р и с. 6. Гистограмма Парето  
F i g. 6. Pareto histogram

Источник: составлено авторами.  
Source: compiled by the authors.

Для оценки значимости полученной математической модели используем статистический критерий Фишера ( $F$ -критерий).

Расчеты декодированных значений коэффициентов математической модели представим в таблице 4.

Т а б л и ц а 4  
T a b l e 4

Декодированные значения коэффициентов математической модели  
Decoded values of the mathematical model coefficients

| Коэффициент математической модели / Mathematical model coefficient | Декодированные значения коэффициентов математической модели / Decoded value of the mathematical model coefficients | Дисперсия / Dispersion |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 1                                                                  | 2                                                                                                                  | 3                      |
| $b_0$                                                              | 5,6054                                                                                                             |                        |
| $b_1$                                                              | -0,0922                                                                                                            | 0,4512                 |
| $b_{11}$                                                           | 0,0225                                                                                                             | 0,0299                 |
| $b_2$                                                              | 0,1126                                                                                                             | 0,8911                 |

Окончание табл. 4 / End of table 4

| 1              | 2       | 3       |
|----------------|---------|---------|
| $b_{22}$       | -0,0081 | 0,1514  |
| $b_3$          | -3,5493 | 0,2278  |
| $b_{33}$       | 0,7193  | 0,4587  |
| $b_{12}$       | 0,0162  | 0,1056  |
| $b_{13}$       | -0,0482 | 0,0182  |
| $b_{23}$       | -0,0214 | 0,0225  |
| $S_{ад.}^2$    |         | 0,0466  |
| $S_{воспр.}^2$ |         | 0,0001  |
| $F_{расч.}$    |         | 466     |
| $F_{табл.05}$  |         | 3,59    |
| $R^2$          |         | 0,94468 |

Анализ полученных данных показывает, что все рассматриваемые факторы, принятые в экспериментальном исследовании оказывают значимое влияние на тяговое сопротивление, так как рассчитанные значения критерия Фишера больше табличного (критического) значения. По коэффициенту детерминации  $R^2 = 0,94468$  математическая модель достаточно полно описывает изменение показателей тягового сопротивления с учетом изучаемых факторов.

Математическая модель в декодированном виде будет выглядеть следующим образом:

$$P_T = 5,6054 - 0,0922h + 0,1126f - 3,5493v + 0,0162hf - 0,0482hv - 0,0214fv + 0,0225h^2 - 0,0081f^2 + 0,7193v^2, \quad (3)$$

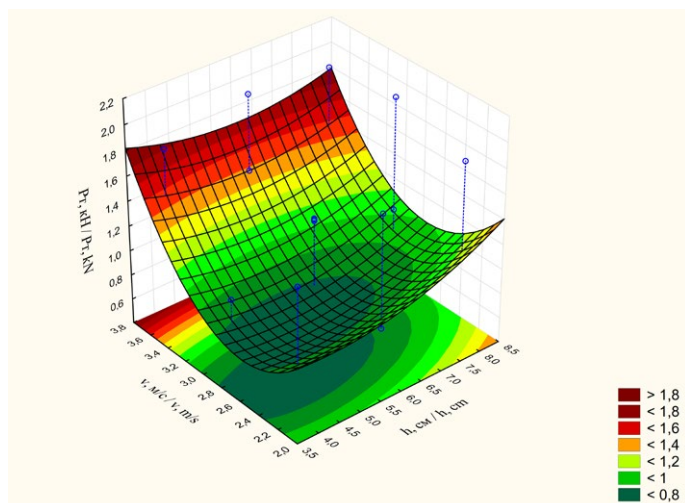
где  $P_T$  – тяговое сопротивление, кН;  $h$  – глубина обработки почвы, см;  $f$  – угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа, град.;  $v$  – скорость движения агрегата, м/с.

Согласно полученной математической модели, наименьшие показатели тягового сопротивления  $P_T = 0,72$  кН достигаются при глубине обработки почвы  $h = 4$  см, угле крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа  $f = 0^\circ$  и скорости движения агрегата  $v = 2,6$  м/с. Угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа рекомендуется принять как  $f = 0^\circ$ , а скорость движения агрегата – как  $v = 2,91$  м/с.

Полученную математическую модель представим в виде графика трехмерной поверхности отклика (рис. 7).

Для построения графика угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа  $f$  фиксировался на уровне рекомендуемых параметров ( $0^\circ$ ).

Учитывая предлагаемые оптимальные параметры рабочего органа, по полученной математической модели можно рассчитать значение показателя тягового сопротивления при различной глубине обработки почвы. Тяговое сопротивление будет изменяться в пределах 0,79–1,81 кН при изменении глубины обработки почвы от 4 до 12 см.



Р и с. 7. График трехмерной поверхности отклика

F i g. 7. 3D response surface plot

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

С точки зрения качественных показателей в ходе экспериментальных исследований было установлено, что наибольшей устойчивостью по глубине хода (7,9–19,6 %) с наименьшей неравномерностью ( $\pm 0,7$ –1,0 см) обладает вариант с установленным углом крошения плоскорежущих крыльев  $f = 0^\circ$  при функционировании во всем диапазоне скоростей движения. При этом же параметре угла крошения гребнистость, по сравнению с другими вариантами (2,5–4,0 см), наименьшая (2,0–2,5 см). Также обеспечивается лучшая выровненность поверхности поля до 1,7–2,0 раз, по сравнению с установленным углом крошения  $f = 5^\circ$  и  $f = 10^\circ$ .

При функционировании варианта с  $f = 0^\circ$  степень крошения пласта увеличивается с ростом скорости движения: с 87,8–88,2 % при 2,21 м/с до 92,3–92,8 % при 3,61 м/с.

Полученная математическая модель тягового сопротивления, создаваемого рабочим органом парового культиватора, позволит более точно подходить к вопросу проектирования сельскохозяйственных машин. Становится возможным рациональное использование мощности мобильных энергосредств при проектировании агрегатов под конкретный тяговый класс, а также снижение металлоемкости всего агрегата ввиду оптимизации количества применяемых рабочих органов на раме машины.

**Обсуждение и заключение.** В результате проведенного исследования была получена математическая модель, учитывающая влияние глубины обработки почвы, углов крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев и скорости движения агрегата. Она позволяет определить оптимальные параметры функционирования рабочего органа парового культиватора с учетом исследуемых факторов. Также было установлено, что при глубине обработки почвы  $h = 4$  см, угле крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев  $f = 0^\circ$  и скорости движения агрегата  $v = 2,61$  м/с достигается наименьшее тяговое сопро-

тивление  $P_T = 0,72$  кН, создаваемое рабочим органом. Угол крошения левостороннего и правостороннего плоскорежущих крыльев рабочего органа рекомендуется принять  $f = 0^\circ$ , а скорость движения агрегата  $v = 2,91$  м/с.

Таким образом, учитывая рекомендуемые оптимальные параметры рабочего органа парового культиватора, по полученной математической модели возможно рассчитать значение показателя тягового сопротивления при различной глубине обработки почвы. Тяговое сопротивление будет варьироваться в пределах 0,79–1,81 кН при изменении глубины обработки почвы от 4 до 12 см.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Припоров Е. В. Технологические, энергетические и экономические показатели работы универсального парового культиватора // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3 (83). С. 198–202. URL: [https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia\\_83\\_2020\\_g.pdf](https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_83_2020_g.pdf) (дата обращения: 01.11.2023).
2. Мяло В. В., Мяло О. В., Демчук Е. В. Обоснование основных параметров рабочего органа культиватора для сплошной обработки почвы // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (34). С. 153–164. URL: [https://www.omgau.ru/upload/iblock/045/24\\_34.pdf](https://www.omgau.ru/upload/iblock/045/24_34.pdf) (дата обращения: 01.11.2023).
3. Свечников П. Г. Оптимальный профиль лапы культиватора-плоскореза // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2012. Т. 79, № 1. С. 40. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69372>
4. Старовойтов С. И. Горизонтальная составляющая тягового сопротивления стрельчатой лапы с переменным углом крошения и с трансформированным лезвием // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 1 (53). С. 79–86. URL: [https://www.bgsha.com/download/education/library/1\(53\)\\_2016.pdf](https://www.bgsha.com/download/education/library/1(53)_2016.pdf) (дата обращения: 01.11.2023).
5. Исследование влияния параметров рабочих органов и режимов работы культиватора модульного типа на качество поверхностной обработки почвы / О. В. Лисунов [и др.] // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 1 (61). С. 190–196. URL: [https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a9c/vestnik-2023-1\(61\).pdf](https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a9c/vestnik-2023-1(61).pdf) (дата обращения: 01.11.2023).
6. Джаббаров Н. И., Сергеев А. В. Классификация условий функционирования и определение рациональных конструктивных параметров почвообрабатывающего рабочего органа // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 3 (104). С. 48–58. URL: <https://agroecoengineering.sznii.ru/images/Jurnal/nomera/zurnal-104.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).
7. Теоретическое обоснование конструктивно-технологической схемы многофункционального почвообрабатывающего агрегата / С. Л. Дёмин [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2020. № 2 (105). С. 18–31. URL: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=1825](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1825) (дата обращения: 01.11.2023).
8. Граборов К. Н., Жилкин В. А. Компьютерное моделирование деформированного состояния «Почвы» в системе MSC. Patran // Достижения науки и техники АПК. 2007. № 6. С. 17–19. URL: <https://clck.ru/39xbT4> (дата обращения: 01.11.2023).
9. 3D Finite Element Analysis of Tine Cultivator and Soil Deformation / M. Hashaam [et al.] // Research in Agricultural Engineering. 2023. Vol. 69, Issue 3. P. 107–117. <https://doi.org/10.17221/58/2022-RAE>
10. Chappell A., Webb N. P. Using Albedo to Reform Wind Erosion Modelling, Mapping and Monitoring // Aeolian Research. 2016. Vol. 23. P. 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.09.006>
11. Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators / Y. Abbaspour-Gilandeh [et al.] // Agriculture. 2020. Vol. 10, Issue 5. P. 145. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>
12. Effects of Fallow Tillage on Winter Wheat Yield and Predictions Under Different Precipitation Types / Y. Feng [et al.] // PeerJ. 2021. Vol. 9. Article no. e12602. <https://doi.org/10.7717/peerj.12602>
13. Konrad J. M., Lebeau M. Capillary-Based Effective Stress Formulation for Predicting Shear Strength of Unsaturated Soils // Canadian Geotechnical Journal. 2015. Vol. 52, Issue 12. P. 2067–2076. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0300>



14. Seasonal and Inter-Annual Variability of Soil Moisture Stress Function in Dryland Wheat Field, Australia / V. R. Akuraju [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017. Vol. 217. P. 450–451. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.007>
15. Moderate Drought Stress Affected Root Growth and Grain Yield in Old, Modern and Newly Released Cultivars of Winter Wheat / Y. Fang [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. Article no. 00672. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00672>
16. Маслов Г. Г., Юдина Е. М., Журий И. А. Эффективность поверхностной обработки почвы стерневым многофункциональным культиватором // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. Т. 85, № 3. С. 7–11. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66365>
17. The Random Vibrations of the Active Body of the Cultivators / P. Cardei [et al.] // *Agriculture*. 2023. Vol. 13. Article no. 1565. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1517.v1>
18. Okoko P., Umani K. C., Onwe D. N. Performance Evaluation of a Spring Tine Cultivator in a Sandy Loam Soil // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2023. Vol. 25, Issue 2. P. 21–33. URL: <https://clck.ru/39x8LA> (дата обращения: 01.11.2023).
19. Sun C., Zhou J., Zhao J. Traction Resistance Estimation Based on Multi-Method Fusion for Distributed Drive Agricultural Vehicles // *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, Issue 10. P. 9580–9588. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3162652>

## REFERENCES

1. Priporov E.V. Technological, Energy and Economic Performance Indices of a Universal Fallow-Field Cultivator. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(3):198–202. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia\\_83\\_2020\\_g.pdf](https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_83_2020_g.pdf) (accessed 01.11.2023).
2. Myalo V.V., Myalo O.V., Demchuk E.V. Foundation of the Basic Parameters of the Working Bodies of Cultivators for Continuous Tillage. *Vestnik of Omsk SAU*. 2019;(2):153–164. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://www.omgau.ru/upload/iblock/045/24\\_34.pdf](https://www.omgau.ru/upload/iblock/045/24_34.pdf) (accessed 01.11.2023).
3. Svecnikov P.G. The Optimal Profile of Subsurface Cultivator Hoe. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2012;79(1):40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-69372>
4. Starovoitov S.I. Horizontal Component of Draft Resistance of Center Hoe with Variable Angle of Crumbling and Transformed Edge. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2016;(1):79–86. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://www.bgsha.com/download/education/library/1\(53\)\\_2016.pdf](https://www.bgsha.com/download/education/library/1(53)_2016.pdf) (accessed 01.11.2023).
5. Lisunov O.V., Boginya M.V., Vasiliev A.A., Oleinikova E.N. Study of Parameter Influence of the Working Bodies and Operating Modes of a Modular Type Cultivator on Quality of Surface Soil Tillage. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2023;(1):190–196. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a9c/vestnik-2023-1\(61\).pdf](https://vestnik.ulsau.ru/upload/iblock/a9c/vestnik-2023-1(61).pdf) (accessed 01.11.2023).
6. Dzhabborov N.I., Sergeev A.V. Classification of Operating Conditions of a Tillage Tool and Determining its Rational Design Parameters. *AgroEcoEngineering*. 2020;(3):48–58. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://agroecoengineering.sznii.ru/images/Jurnal/nomera/zhurnal-104.pdf> (accessed 01.11.2023).
7. Demshin S.L., Andreev L.A., Ilyichev V.V., Isupov A.Ju. Theoretical Justification of the Constructive-Technological Scheme of the Multifunctional Tillage Unit. *Bulletin NGIEI*. 2020;(2):18–31. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=1825](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1825) (accessed 01.11.2023).
8. Graborov K.N., Zhilkin V.A. [Computer Modeling of the Deformed State of the “Soil” in the MSC System Patran]. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2007;(6):17–19. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/39xbT4> (accessed 01.11.2023).
9. Hashaam M., Akram M.W., Ahmad M., Akram M.Z., Faheem M., Maqsood M., et al. 3D Finite Element Analysis of Tine Cultivator and Soil Deformation. *Research in Agricultural Engineering*. 2023;69(3):107–117. <https://doi.org/10.17221/58/2022-RAE>
10. Chappell A., Webb N.P. Using Albedo to Reform Wind Erosion Modelling, Mapping and Monitoring. *Aeolian Research*. 2016;23:63–78. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.09.006>
11. Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernández-Hernández J.L., Penna A.F., Herrera-Miranda I. Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators. *Agriculture*. 2020;10(5):145. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>



12. Feng Y., Lin W., Yu S., Ren A., Wang Q., Noor H., et al. Effects of Fallow Tillage on Winter Wheat Yield and Predictions Under Different Precipitation Types. *PeerJ*. 2021;9:e12602. <https://doi.org/10.7717/peerj.12602>
13. Konrad J.M., Lebeau M. Capillary-Based Effective Stress Formulation for Predicting Shear Strength of Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 2015;52(12):2067–2076. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0300>
14. Akuraju V.R., Ryu D., George B., Ryu Y., Dassanayake K. Seasonal and Inter-Annual Variability of Soil Moisture Stress Function in Dryland Wheat Field, Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017;217:450–451. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.007>
15. Fang Y., Du Y., Wang J., Wu A., Qiao S., Xu B., et al. Moderate Drought Stress Affected Root Growth and Grain Yield in Old, Modern and Newly Released Cultivars of Winter Wheat. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:00672. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00672>
16. Maslov G.G., Yudina E.M., Zhurij I.A. Efficiency of Surface Treatment of Soil by a Stubble Multifunctional Cultivator. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;85(3):7–11. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66365>
17. Cardei P., Constantin N., Muraru V., Persu C., Sfiru R., Vladut N.-V., et al. The Random Vibrations of the Active Body of the Cultivators. *Agriculture*. 2023;13:1565. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1517.v1>
18. Okoko P., Umani K. C., Onwe D.N. Performance Evaluation of a Spring Tine Cultivator in a Sandy Loam Soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2023;25(2):21–33. Available at: <https://clck.ru/39x8LA> (accessed 01.11.2023).
19. Sun C., Zhou J., Zhao J. Traction Resistance Estimation Based on Multi-Method Fusion for Distributed Drive Agricultural Vehicles. *IEEE Sensors Journal*. 2022;22(10):9580–9588. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3162652>

*Об авторах:*

**Божко Игорь Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, Researcher ID: E-9518-2016, [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

**Камбулов Сергей Иванович**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), профессор кафедры технологий и оборудования переработки продукции АПК Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Researcher ID: A-6156-2019, [kambulov.s@mail.ru](mailto:kambulov.s@mail.ru)

**Пархоменко Галина Геннадьевна**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, Researcher ID: D-2633-2019, [parkhomenko.galya@yandex.ru](mailto:parkhomenko.galya@yandex.ru)

**Рыков Виктор Борисович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), профессор кафедры технологий и оборудования переработки продукции АПК Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1358-9312>, Researcher ID: A-6319-2019, [rikovvb@gmail.com](mailto:rikovvb@gmail.com)

**Подлесный Дмитрий Сергеевич**, ведущий инженер отдела механизации растениеводства лаборатории механизации полеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), старший преподаватель кафедры технологий и оборудования переработки продукции АПК Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-138X>, Researcher ID: L-3658-2017, [podlesniy.dmitri@yandex.ru](mailto:podlesniy.dmitri@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

И. В. Божко – определение методологии исследования, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, проведение экспериментальных исследований и обработка полученных данных.

С. И. Камбулов – научное руководство, постановка задачи, обработка полученных данных.

Г. Г. Пархоменко – анализ научных источников по теме исследования, обработка полученных данных.

В. Б. Рыков – определение методологии исследования, обработка полученных данных.

Д. С. Подлесный – проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 25.11.2023; поступила после рецензирования 23.01.2024;  
принята к публикации 05.02.2024*

*About the authors:*

**Igor V. Bozhko**, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8423-4079>, Researcher ID: E-9518-2016, [i.v.bozhko@mail.ru](mailto:i.v.bozhko@mail.ru)

**Sergey I. Kambulov**, Dr.Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Professor of the Department Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-1478>, Researcher ID: A-6156-2019, [kambulov.s@mail.ru](mailto:kambulov.s@mail.ru)

**Galina G. Parkhomenko**, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1944-216X>, Researcher ID: D-2633-2019, [parkhomenko.galya@yandex.ru](mailto:parkhomenko.galya@yandex.ru)

**Victor B. Rykov**, Dr.Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Professor of the Department Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1358-9312>, Researcher ID: A-6319-2019, [rikovvb@gmail.com](mailto:rikovvb@gmail.com)

**Dmitry S. Podlesny**, Leading Engineer of the Department of Plant Mechanization, Laboratory of Field Cultivation, Agrarian Scientific Center Donskoy (3 Nauchny gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Senior Lecturer of the Department of Technologies and Equipment for Processing Agricultural Products, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-138X>, Researcher ID: L-3658-2017, [podlesny.dmitri@yandex.ru](mailto:podlesny.dmitri@yandex.ru)

*Authors contribution:*

I. V. Bozhko – determining the research methodology, collecting and analyzing analytical and practical materials on the research topic, conducting experimental studies and processing the data obtained, analyzing and finalizing the solution.

S. I. Kambulov – scientific leadership, problem formulation, finalization of the solution.

G. G. Parkhomenko – analysis of scientific sources on the research topic, finalization of the solution.

V. B. Rykov – determining the research methodology, finalizing the solution.

D. S. Podlesny – conducting experimental research and finalizing the solution.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

*Submitted 25.11.2023; revised 23.01.2024; accepted 05.02.2024*