

4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья
УДК 631.362.36
DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_4_90

Взаимосвязь аэродинамических показателей фракций сыпучего материала

Владимир Васильевич Василенко^{1✉}, Владимир Иванович Оробинский²,
Сергей Владимирович Василенко³, Денис Николаевич Посохов⁴

^{1, 2, 3, 4}Воронежский государственный аграрный университет

имени императора Петра I, Воронеж, Россия

¹vladva.vasilenko@yandex.ru[✉]

Аннотация. При проектировании технологий и технических средств аэродинамической очистки и сортирования зерновых смесей в настоящее время достаточно знать три главных показателя, характеризующих свойства компонентов смеси: скорость витания частицы, ее коэффициент сопротивления и коэффициент парусности. Эти показатели зависят от очень многих факторов, их число может уходить в бесконечность, и их влияние асимптотически приближается к нулю. Коэффициент сопротивления характеризует способность частицы принимать силу ветра или искусственно созданного потока воздуха, зависит только от формы тела и состояния его поверхности, измеряется в долях единицы. Коэффициент парусности характеризует способность тела подчиняться действующей силе путем изменения скорости и направления своего движения, зависит от размеров и массы тела, а также от коэффициента сопротивления. Единицей измерения коэффициента парусности является m^{-1} . Скорость витания показывает скорость восходящего потока воздуха, при которой тело не падает вниз, а зависает на месте. Это также максимально возможная скорость свободного падения в неподвижном воздухе. Все аэродинамические системы в зерноочистительных машинах рассчитаны на действие создаваемого воздушного потока. Однако создаваемые потоки имеют неравномерные скорости, что ухудшает качество очистки. Перспективной может быть очистка зерна в неподвижном воздухе, но для этого следует ввести еще один показатель – время падения различных семян в неподвижной воздушной среде с заданной высоты. Этот показатель находится в аналитической зависимости от коэффициента парусности семени. Расчеты показали, что с увеличением высоты падения разница времени свободного падения увеличивается, что допускает возможность принимать отдельно фракции зерновой смеси в различные отсеки подвижного приемного устройства.

Ключевые слова: воздушный поток, неподвижный воздух, коэффициент парусности, высота падения, скорость падения, время падения

Для цитирования: Василенко В.В., Оробинский В.И., Василенко С.В., Посохов Д.Н. Взаимосвязь аэродинамических показателей фракций сыпучего материала // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 4(75). С. 90–96. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_4_90–96.

4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

The relationship of aerodynamic parameters of fractions of bulk material

Vladimir V. Vasilenko^{1✉}, Vladimir I. Orobinsky², Sergei V. Vasilenko³, Denis N. Posokhov⁴

^{1, 2, 3, 4}Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹vladva.vasilenko@yandex.ru[✉]

Abstract. When designing technologies and technical means of aerodynamic separation and grain mixtures grading, it is currently sufficient to know three main indicators characterizing the properties of the components of the mixture, i. e. hovering velocity of the particle, its resistance coefficient, and the coefficient of sailing capacity. These indicators depend on many factors, their number can go into infinity, and their influence asymptotically comes close to zero. The resistance coefficient characterizes the ability of a particle to accept the force of wind or an artificially created air flow, depends only on the shape of the body and the state of its surface, and is usually

expressed as decimal quantity. The coefficient of sailing capacity characterizes the ability of the body to obey the acting force by changing the speed and direction of its movement, depends on the size and weight of the body, as well as on the resistance coefficient. The unit of measurement of this coefficient is m^{-1} . The hovering velocity shows the speed of the ascending air flow, at which the body does not fall down, but hangs in place. It is also the maximum possible speed of free fall in still air. All aerodynamic systems in grain separating machines are designed for the action of the created air current. However, the created flows have uneven speeds, which worsen the quality of separation. Grain separation in still air may be promising, but for this mode one more indicator should be introduced, i.e. the time of falling of various seeds in a fixed air environment from a given height. This indicator is analytically dependent on the coefficient of seed sailing capacity. Calculations have shown that with an increase in the height of fall, the difference in free fall time increases, which makes it possible to receive fractions of the grain mixture separately into different compartments of the mobile receiving device.

Key words: airflow, stationary air, coefficient of seed sailing capacity, height of fall, fall speed, fall time

For citation: Vasilenko V.V., Orobinsky V.I., Vasilenko S.V., Posokhov D.N. The relationship of aerodynamic parameters of fractions of bulk material. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(4):90-96. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_4_90-96.

Введение

Аэродинамический способ очистки семян от примесей является самым древним способом, применяемым еще шумерами и египтянами в самом начале становления земледелия. Проще всего было подвергнуть падающий поток семян обдуву ветром, чтобы отделить их от легковесных примесей [5]. Современные научные представления об этом процессе учитывают аэродинамические свойства частиц, составляющих ту или иную фракцию сыпучего материала, чтобы обоснованно выбрать рациональную скорость воздушного потока.

При проектировании технологий и технических средств аэродинамической очистки и сортирования зерновых смесей в настоящее время достаточно знать три главных показателя, характеризующих свойства компонентов смеси: скорость витания частицы, ее коэффициент сопротивления и коэффициент парусности. Эти показатели зависят от очень многих факторов, их число может уходить в бесконечность, и их влияние асимптотически приближается к нулю, поэтому аналитически эти коэффициенты определить невозможно, нужен эксперимент.

Самым простым является нахождение скорости витания. Скоростью витания названа скорость восходящего воздушного потока, который создает подъемную силу, равную и противоположную силе тяжести частицы сыпучего материала, и эта частица чисто теоретически задерживается на месте. При свободном падении в неподвижном воздушном пространстве тело (или частица) ускоряется не более, чем до скорости витания. Экспериментально эту скорость измеряют в аэродинамической трубе, а затем по формулам взаимного влияния на другие показатели определяют коэффициент сопротивления и коэффициент парусности. Коэффициент сопротивления характеризует способность тела или частицы воспринимать силу действия воздушного потока. Его уровень исчисляется в долях единицы от максимально возможной силы действия воздушного потока, движущегося со скоростью V_0 , на поперечную площадку с размером E , поэтому у него нет единиц измерения. На этот коэффициент влияют только форма тела (обтекаемая или произвольная) и состояние поверхности (глянцевая, ворсистая, пористая). В отличие от коэффициента сопротивления коэффициент парусности характеризует реакцию тела на приложенную силу, то есть способность тела изменять траекторию своего движения, зависит от массы тела, его размера и коэффициента сопротивления. Единицей измерения коэффициента парусности является m^{-1} .

Силу действия воздуха на обдуваемое тело впервые вычислил И. Ньютон, применив следующую предложенную им формулу [1, 6]:

$$F_2 = k \frac{\gamma}{g} E(V_a - U)^2, \quad (1)$$

где k – коэффициент сопротивления;

γ – удельный вес воздуха, равный $1,249 \text{ Н/м}^3$;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

E – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению воздушного потока (миделевое сечение), м^2 ;

V_a – скорость воздуха, м/с ;

U – скорость движения тела, м/с .

Формула (1) оказалась фундаментальной для определения остальных свойств зернового материала и модернизации пневмосепарирующих систем. Кроме того, она свидетельствует о том, что управлять рабочим процессом можно только путем изменения скорости воздушного потока и скорости подачи обрабатываемого материала.

При проектировании аэродинамических систем в воздушно-решетчатых зерноочистительных машинах основной задачей является создание в рабочих каналах нагнетательного или аспирационного действия равномерной по всему сечению канала скорости движения воздуха и подачи очищаемого материала [7, 8, 11]. Однако создание воздушных потоков вентиляторами без промежуточных ресиверов приводит к турбулентности и неравномерности скоростей по площади канала [9, 10], что снижает качество очистки.

Постановка задачи и метод решения

Качество аэродинамической сепарации зерновых смесей можно улучшить, если отказаться от силового воздействия на смесь воздушным потоком и заставить двигаться обрабатываемый материал в неподвижном воздухе. Способы и установки могут быть различными, но для их создания требуется проанализировать взаимосвязь трех упомянутых свойств сыпучего материала и внести некоторые дополнения в перечень свойств. Дополнительным свойством может быть время падения частицы в воздушном пространстве с определенной высоты.

Метод определения времени падения состоит в составлении и решении дифференциального уравнения движения тела в рабочем канале аэродинамической очистки. На рисунке 1 показана схема сил, действующих на падающее семя в рабочем канале.

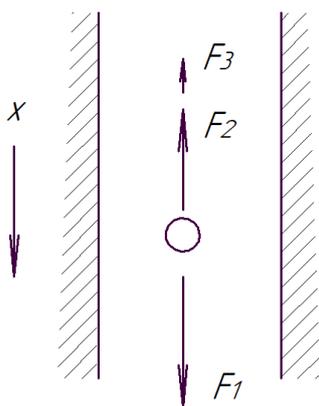


Рис. 1. Схема сил, действующих на семя в аэродинамическом канале

Решение задачи проводится с учетом действия трех сил:

F_1 – сила тяжести $F_1 = mg$, Н;

F_2 – сила сопротивления воздуха, Н;

F_3 – сила инерции, Н.

Силу F_2 можно определить по уравнению (1), а силу инерции – по следующему выражению:

$$F_3 = m\ddot{x},$$

где m – масса частицы, кг;

\ddot{x} – ускорение частицы, м/с².

Результаты и их обсуждение

Известно [6], что коэффициент парусности вычисляется по выражению

$$k_n = \frac{k\gamma E}{G}, \quad (2)$$

где G – сила веса частицы, Н;

Если существует восходящий поток воздуха, а сила F_2 уравновешивает силу F_1 при $F_3 = 0$, то скорость воздушного потока называется критической (или скоростью витания) и определяется из уравнения (1)

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{G \cdot g}{k \cdot \gamma \cdot E}} = \sqrt{\frac{g}{k_n}}, \quad (3)$$

где $V_{кр}$ – критическая скорость воздуха (скорость витания), м/с.

Если воздух неподвижен, то силы F_2 и F_3 могут определяться по следующим выражениям:

$$F_2 = k \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot E \cdot \dot{x}^2 = \frac{m \cdot g}{V_{кр}^2} \cdot \dot{x}^2, \quad (4)$$

$$F_3 = m \cdot \ddot{x}, \quad (5)$$

где \dot{x} – скорость падения семени, м/с;

\ddot{x} – ускорение падения семени в воздушной среде, м/с².

Сумма всех действующих сил должна быть равна нулю, поэтому

$$m \cdot g - \frac{m \cdot g}{V_{кр}^2} \cdot \dot{x}^2 - m \cdot \ddot{x} = 0, \quad (6)$$

или

$$g - k_n \cdot \dot{x}^2 - \ddot{x} = 0. \quad (7)$$

Полученное выражение (7) является дифференциальным уравнением второго порядка, где пройденный семенем путь в его падении является функцией времени: $x = f(t)$. В результате решения этого уравнения получена аналитическая зависимость времени падения семени от высоты x :

$$t = \frac{1}{2\sqrt{gk_n}} \cdot \ln \left| \frac{\sqrt{1 - e^{-2k_n x}} + 1}{\sqrt{1 - e^{-2k_n x}} - 1} \right|, \quad (8)$$

где t – время падения семени, с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

k_n – коэффициент парусности семени, м⁻¹;

x – высота падения, м.

Выражение (8) показывает существенную зависимость времени падения частиц сыпучей смеси от коэффициента парусности, что может быть принято отличительным признаком сепарации фракций в неподвижной воздушной среде. В литературе существует много сведений об аэродинамических свойствах семян различных культур [1, 2, 3, 4]. Воспользуемся этими сведениями, чтобы рассчитать время падения различных частиц с заданной высоты (см. табл.).

Расчет времени падения частиц вороха в неподвижной воздушной среде с высоты $x = 4$ м

Культура / компонент зерновой смеси	Коэффициент сопротивления k	Скорость витания $V_{кр}$, м/с	Коэффициент парусности K_p , м ⁻¹	Среднее время падения t , с
Пшеница	0,084–0,265	8,9–11,5	0,074–0,124	0,964
Ячмень	0,191–0,272	8,4–10,8	0,084–0,139	0,971
Кукуруза	0,162–0,236	12,5–14,0	0,050–0,063	0,937
Овес	0,169–0,300	8,1–9,1	0,118–0,150	0,985
Просо	0,045 – 0,073	6,7–8,8	0,127–0,219	1,010
Гречиха	–	4,4–8,0	0,153–0,507	1,109
Горох	0,190–0,229	15,5–17,5	0,032–0,041	0,925
Чечевица	0,359–0,601	8,3–9,8	0,102–0,142	0,978
Овсяг	–	6,9	0,206	1,031
Кусочки соломы	–	5,1	0,377	1,138

Качество разделения на фракции будет выше при большей разнице времени падения сепарируемых компонентов зерновой смеси, поэтому исследуем, как влияет высота падения на этот показатель. Результаты вычислений представлены графически на рисунке 2.

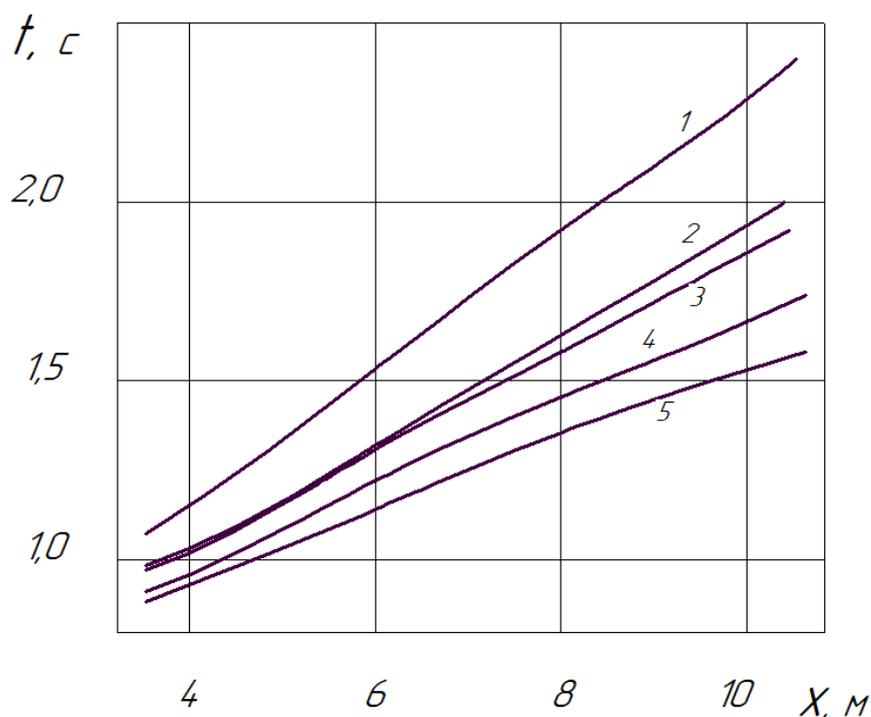


Рис. 2. Влияние высоты падения компонентов зерновой смеси на время падения: 1 – кусочки соломы; 2 – овсяг; 3 – просо; 4 – пшеница; 5 – горох

Выполненные расчеты показали, что с увеличением высоты падения разница времени свободного падения увеличивается. С учетом этого явления может быть реализован принцип раздельного сбора сепарируемых компонентов в отсеки подвижного приемного устройства.

Заключение

Для разработки способа и устройства, осуществляющего аэродинамическую сепарацию зерновой смеси в неподвижном воздухе, предложен и обоснован расчетным путем новый показатель аэродинамических свойств семян – время падения в неподвижной воздушной среде с заданной высоты.

Как следует из представленных данных, этот показатель находится в аналитической зависимости от коэффициента парусности семян.

Установлено, что разница времени падения частиц с различными коэффициентами парусности увеличивается по мере увеличения высоты падения, что создает возможности раздельного сбора сепарируемых компонентов в отсеки подвижного приемного устройства.

Список источников

1. Анисимов А.В. Результаты экспериментального определения аэродинамических свойств зерна пшеницы и его оболочек // Наука и образование. 2020. Т. 3, № 4. С. 11–15.
2. Аэродинамические свойства зерна [Электронный ресурс]. URL: <https://visacon.ru/zernovedenie/1842-aerodinamicheskie-svoystva-zerna.html> (дата обращения: 03.06.2022).
3. Василенко В.В. История механизации земледелия: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2010. 160 с.
4. Василенко В.В., Гиевский А.М., Чернышов А.В. Теория и расчет рабочих органов сельскохозяйственных машин: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. 2-е изд., испр. и доп. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. 194 с.
5. Воздушно-решетная зерноочистительная машина: патент на полезную модель № 74834 Рос. Федерация. № 2007133684/22; заявл. 07.09.07; опубл. 20.07.08. Бюл. № 20. 14 с.
6. Гиевский А.М., Никульников А.А. Повышение эффективности работы канала послерешетной очистки // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (Воронеж, 26–27 ноября 2015 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. Ч. II. С. 272–279.
7. Гиевский А.М. Исследование работы диаметрального вентилятора в пневмосистемах машин серии ОЗФ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 6. С. 35–36.
8. Гиевский А.М. Совершенствование пневмосепарирования зерна машинами серии ОЗФ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 10. С. 5.
9. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Колос, 1980. 304 с.
10. Ковриков И.Т. Технологическое оборудование предприятий по хранению, обработке и переработке зерна: учебник. Оренбург: ОГУ, 2009. 250 с.
11. Тарабрин Д.С., Тарасенко А.П., Гиевский А.М. Распределение зернового вороха в вертикальном пневмосепарирующем канале // Наука вчера, сегодня, завтра: материалы международной научно-практической конференции. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. С. 239–243.

References

1. Anisimov A.V. Rezul'taty eksperimental'nogo opredeleniya aerodinamicheskikh svoystv zerna pshe-nitsy i ego obolochek [Results of the experimental determination of aerodynamic properties of wheat grain and its seed coats]. *Nauka i obrazovanie = Science and Education*. 2020;3(4):11-15. (In Russ.).
2. Aerodynamic properties of grain. URL: <https://visacon.ru/zernovedenie/1842-aerodinamicheskie-svoystva-zerna.html>. (In Russ.).

3. Vasilenko V.V. Istoriya mekhanizatsii zemledeliya: uchebnoye posobiye dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenij [History of agricultural mechanization: Textbook for students of higher education establishments]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2010. 160 p. (In Russ.).

4. Vasilenko V.V., Gievskiy A.M., Chemyshev A.V. Teoriya i raschet rabochikh organov sel'skokhozyajstvennykh mashin: uchebnoye posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenij. 2-e izd., ispr. i dop. [Theory and calculation of working bodies of agricultural machines: Textbook for students of higher education establishments. 2nd edition, revised and enlarged]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2019. 194 p. (In Russ.).

5. Vozdushno-reshetnaya zernoochistitelnaya mashina [Air sieve grain cleaning machine]: Patent na poleznuyu model 74834 Ros. Federatsiya. № 2007133684/22; zayavleno 07.09.2007; opublikovano 20.07.2008. Byul. № 20 = Utility model patent 74834 Russian Federation. No. 2007133684-22, claimed 07.09.2007; published 20.07.2008. Bulletin 20. 14 p. (In Russ.).

6. Gievsky A.M., Nikulnikov A.A. Povysheniye effektivnosti raboty kanala poslereshetnoj ochistki [Improving the efficiency of the post-screen cleaning channel]. Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva dlya APK: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov (Voronezh, 26-27 noyabrya 2015 g.) [Innovative technologies and technical means for Agro-Industrial Complex: Proceedings of International scientific-practical conference of Young Researchers and Specialists Voronezh, November 26-27, 2015]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2015:272-279. (In Russ.).

7. Gievskiy A.M. Issledovaniye raboty diametral'nogo ventilyatora v pnevmosistemakh mashin serii OZF [Investigation of the operation of a crossflow fan in the pneumatic systems of machines of the OZF series]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva = Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2008;6:35-36. (In Russ.).

8. Gievskiy A.M. Sovershenstvovaniye pnevmoseparirovaniya zerna mashinami serii OZF [Improving grain pneumatic separating by machines of the OZF series]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva = Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2008;10:5. (In Russ.).

9. Gortinskiy V.V., Demskiy A.B., Boriskin M.A. Protsessy separirovaniya na zernope-rerabatyvayushchikh predpriyatiyakh. 2-e izd., pererab. i dop. [Separation processes at grain processing enterprises. 2nd edition, revised and enlarged]. Moscow: Kolos; 1980. 304 p. (In Russ.).

10. Kovrikov I.T. Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriyatij po khraneniuyu, obrabotke i pererabotke zerna: uchebnik [Technological equipment of grain storage, handling and processing enterprises: textbook.]. Orenburg: Orenburg State University Press; 2009. 250 p. (In Russ.).

11. Tarabrin D.S., Tarasenko A.P., Gievskiy A.M. Raspredeleniye zernovogo vorokha v vertikal'nom pnevmosepariruyushchem kanale [Distribution of grain heap in the vertical pneumoseparating channel]. *Nauka vchera, segodnya, zavtra: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science yesterday, today, tomorrow: Proceedings of International Scientific and Practical Conference]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2016:239-243. (In Russ.).

Информация об авторах

В.В. Василенко – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», vladva.vasilenko@yandex.ru.

В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, зав. кафедрой сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей, декан агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», main@agroeng.vsau.ru.

С.В. Василенко – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», tuli-fruli@mail.ru.

Д.Н. Посохов – аспирант кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», smachin@agroeng.vsau.ru.

Information about the authors

V.V. Vasilenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, vladva.vasilenko@yandex.ru.

V.I. Orobinsky, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Dean of the Faculty of Rural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, main@agroeng.vsau.ru.

S.V. Vasilenko, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, tuli-fruli@mail.ru.

D.N. Posokhov, Postgraduate Student, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, smachin@agroeng.vsau.ru.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 25.10.2022; принята к публикации 16.12.2022.

The article was submitted 10.10.2022; approved after reviewing 25.10.2022; accepted for publication 16.12.2022.

© Василенко В.В., Оробинский В.И., Василенко С.В., Посохов Д.Н., 2022