

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINES AND EQUIPMENT


<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.000-000>

EDN: <https://elibrary.ru/wfxqhh>

УДК 631.362.3

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



К обоснованию конструктивных параметров очистителя корнеплодов от почвы

**В. И. Курдюмов[✉], Ю. М. Исаев,
А. А. Павлушин, Е. М. Горельшев**

*Ульяновский государственный аграрный университет
имени П. А. Столыпина*

(г. Ульяновск, Российская Федерация)

✉ vova73ulgau@yandex.ru

Аннотация

Введение. Задача качественной очистки корнеплодов от почвы актуальна на всех стадиях их подготовки к переработке, продаже и скармливанию животным. Применяемые машины для очистки корнеплодов от загрязнений чаще всего используют воду. При затратах до 200–400 % воды на мойку единицы массы загрязненных корнеплодов ее использование создаст огромную проблему, в том числе и по очистке загрязненной воды. Наиболее распространенный в практике сухой способ очистки корнеплодов связан с использованием соответствующих машин, которые не всегда способны обеспечить требуемое качество готового продукта. Поэтому разработка очистителя корнеплодов, реализующего сухой способ очистки, и обоснование его оптимальных параметров, обеспечивающих требуемое качество готовой продукции, является важной и актуальной задачей.

Цель исследования. Теоретическое обоснование параметров очистителя корнеплодов со смежными роликами, вращающимися с разной частотой.

Материалы и методы. Объектом исследования стал технологический процесс очистки корнеплодов сухим способом. Для реализации этого процесса разработан и предложен очиститель корнеплодов от почвы, принципиальными особенностями которого являются использование роликового транспортирующе-очищающего рабочего органа и придание смежным роликам возможности вращения с различной частотой. Выполнено теоретическое обоснование отдельных конструктивных параметров предложенного очистителя.

Результаты исследования. Определены силы, действующие на корнеплод при его расположении на вращающихся роликах. Получена зависимость углового перемещения $\varphi(t)$ и угловой скорости $\omega(t)$ корнеплода, находящегося на вращающихся роликах, а также зависимость коэффициента трения скольжения корнеплода о ролики от угла α , определяющего взаимосвязь основных конструктивных параметров рабочего органа, в частности, диаметра роликов и расстояния между ними, и физико-механических свойств корнеплодов.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования очистителя корнеплодов в лабораторных условиях подтвердили результаты теоретических исследований и показали, что при длине транспортирующе-очищающего рабочего органа 2 м

© Курдюмов В. И., Исаев Ю. М., Павлушин А. А., Горельшев Е. М., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

за время 34,4 с можно достичь эффективности очистки 78 % при оснащении машины 16 роликами и соотношении частот вращения нечетных и четных роликов 220/250 мин⁻¹. Результаты исследований будут полезны при создании и модернизации технических средств по послеуборочной обработке корнеплодов, проведении дальнейших исследований по технологическому совершенствованию аналогичных средств механизации сельскохозяйственных процессов, а также в учебном процессе при подготовке технических специалистов.

Ключевые слова: корнеплоды, очиститель, почва, конструктивные параметры, ролики, коэффициент трения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Курдюмов В.И., Исаев Ю.М., Павлушин А.А., Горелышев Е.М. К обоснованию конструктивных параметров очистителя корнеплодов от почвы. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(1):000–000. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.000-000>

Substantiating the Design Parameters of a Root Crop Cleaner

V. I. Kurdyumov[✉], Yu. M. Isaev,
A. A. Pavlushin, E. M. Gorelyshev

*Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin
(Ulyanovsk, Russian Federation)*

[✉] vova73ulgau@yandex.ru

Annotation

Introduction. The task of high-quality cleaning of root crops from soil is relevant at all stages of preparing roots for further processing, feeding to animals, and selling. In the machines for cleaning root crops from soil, there is mostly used water. With the water consumption for washing a unit of mass of soiled root crops up to 200–400%, the use of water creates a huge problem including soiled water treatment. The dry method of cleaning root crops is most common in practice and involves the use of appropriate machines, which are not always able to provide the required quality of the finished product. Therefore, the problem of developing a root crop cleaner by the dry cleaning method and substantiating the cleaner optimal parameters to ensure the required quality of the finished product is important and relevant.

Aim of the Study. The study is aimed at substantiating theoretically the parameters of a root cleaner with adjacent rollers rotating at different frequencies.

Materials and Methods. The subject of the study is the technological process of cleaning root crops with the dry method. To realize this process, there has been developed a cleaner of root crops from soil, the key features of which are the use of a roller transport-cleaning working element and the ability of adjacent rollers rotate at different frequencies. Individual design parameters of the proposed cleaner have been substantiated theoretically.

Results. There have been determined the forces acting on the root crop when it is located on rotating rollers. There has been found the dependence of the angular displacement $\varphi(t)$, angular velocity $\omega(t)$ of the root crop located on rotating rollers, and the dependence of the coefficient of root crop sliding friction on the rollers on the angle α , which determines the relationship between the main design parameters of the working element, in particular, the diameter of the rollers and the distance between them, and the physical and mechanical properties of the root crops.

Discussion and Conclusion. The studies of the root crop cleaner conducted in laboratory conditions have confirmed the results of theoretical studies and showed that with a length of the transport-cleaning working element of 2 m within a time of 34,4 s

it is possible to achieve an efficient cleaning of 78% when the cleaner is equipped with 16 rollers and the ratio of the rotation frequencies for odd and even rollers is 220/250 min⁻¹. The study results are useful for creating and modernizing technical means for post-harvest processing of root crops, conducting further studies on technological improvement of similar means of mechanization of agricultural processes, and for using in the educational process to train technical specialists.

Keywords: root crops, cleaner, soil, design parameters, root crops, rollers, friction coefficient

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Kurdyumov V.I., Isaev Yu.M., Pavlushin A.A., Gorelyshev E.M. To Substantiating the Design Parameters of a Root Crop Cleaner. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(1):000–000. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202501.000-000>

Введение. Задача качественной очистки корнеплодов от почвы актуальна не только на стадии их уборки, но и на стадии подготовки к скармливанию животным, дальнейшей переработке и продаже. Например, средняя минимальная стоимость неочищенного от почвы картофеля составляет 44 руб. за кг, а цена продажи чистого картофеля, подготовленного для жарки, может превышать данную стоимость в 2,27 раза¹. Применяемые для очистки корнеплодов от загрязнений стационарные машины при реализации технологического процесса в основном используют воду [1; 2]. Учитывая, что на мойку единицы массы загрязненных корнеплодов требуется до 200–400 % воды², на очистку только собираемого в Российской Федерации урожая картофеля потребуется 15–35,2 тыс. т чистой воды, которую в последующем необходимо очистить. Способы очистки корнеплодов с использованием вибраций, ультразвука или теплоты отработавших газов двигателей внутреннего сгорания [3–5] требуют дополнительных устройств [6; 7], что усложняет конструкцию машин, снижает их производительность. Такие машины также могут быть экологически небезопасными. Более предпочтителен сухой способ очистки корнеплодов³ [8–10], однако выпускаемые машины [11] для реализации этого способа [12; 13] не всегда способны обеспечить требуемое качество готового продукта⁴ [14–16]. Поэтому проблема разработки очистителя корнеплодов, реализующего сухой способ очистки, и обоснования его оптимальных параметров, обеспечивающих требуемое качество готовой продукции, является важной и актуальной.

Целью проводимых научных изысканий стала интерпретация на основе теоретических аспектов режимных и конструктивных характеристик разрабатываемого

¹ Парламентская газета. Издание Федерального собрания Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pnp.ru/economics/kto-nakormit-rossiyu-kartoshkoy.html>.

² Яровенко В.Л., Устинников Б.А., Богданов Ю.П., Громов С.И. Справочник по производству спирта. Сырье, технология и теххимконтроль. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 336 с. URL: <https://www.chem21.info/page/249172081121086065028238168118188185071206215129/>.

³ Яковлева А.О., Виноградов Н.Н., Захаров С.В. Анализ устройств для сухой очистки корнеклубнеплодов // Актуальные вопросы науки и практики: сборник научных трудов по материалам XIX Международной научно-практической конференции. 2020. С. 105–108. EDN: MYMAJV

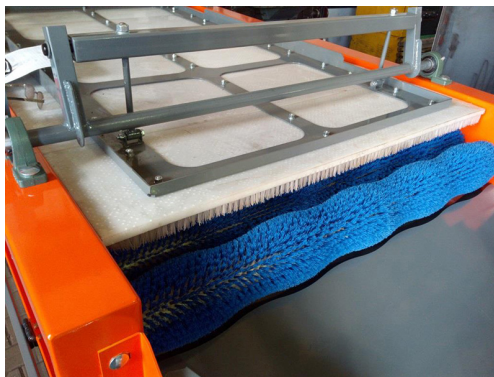
⁴ Агейчик В.А., Романюк Н.Н., Гильдюк К.В., Хартанович А.М. К вопросу повышения качества очистки корнеплодов от почвы // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы IX Международной научно-практической конференции. Саратов, 2022. С. 433–437. EDN: ACASKF

очистителя корнеплодов, конструктивной особенностью которого являются вращающиеся с различной частотой ролики.

Обзор литературы. Машины для сухой очистки корнеплодов, как правило, используют в качестве элементов рабочего органа щетки различного типа, щетинки которых выполнены из нейлона, полиамида, полиэстера, капрона и других материалов [11]. Например, машина для сухой очистки овощей МСО-1011 (рис. 1) массой 450 кг и пропускной способностью до 8 т/ч имеет 10 щеточных валов шириной 1 100 мм. По требованию заказчика производитель может снабдить машину либо прямыми, либо волнообразными нейлоновыми щетками.



a)



b)

Р и с. 1. Машина для сухой очистки овощей МСО-1011:
а) общий вид; б) основной рабочий орган

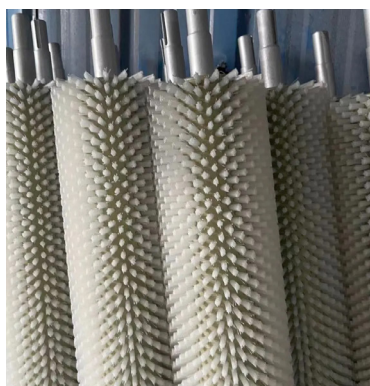
F i g. 1. Machine for dry cleaning of vegetables MSO-1011:
a) general view; b) main working element

Источник: изображения взяты из источников: а) <https://polag.ru/shop/mashina-dlya-suhoj-ochistki-mso-1011/>; б) <https://dzen.ru/a/YPRPPZy68G9onXE9>.

Source: image is taken from source а) <https://polag.ru/shop/mashina-dlya-suhoj-ochistki-mso-1011/>; б) <https://dzen.ru/a/YPRPPZy68G9onXE9>.

Модели МСО-1611 и МСО-1616 отличаются пропускной способностью (до 12 т/ч и до 18 т/ч соответственно), количеством щёточных валов, массой и большей стоимостью, достигающей у упомянутой последней модели 1,4 млн руб.

Качество очистки корнеплодов от загрязнений во многом определяется как качеством самих щеток, так и их формой (рис. 2). Лучшую степень очистки обеспечивают щетки, выполненные из качественных материалов и имеющие форму волны.



a)



b)



c)



d)

Р и с. 2. Формы щеток:

a) цилиндрическая; b) ступенчатая винтовая; c) волновая; d) ступенчатая коническая

F i g. 2. Brush shapes:

a) cylindrical; b) stepped helical; c) wave; d) stepped conical

Источник: изображения взяты из источников: a) <https://clck.ru/3GS47Z>; b) <https://clck.ru/3GS3tr>; c) <https://clck.ru/3GS3zJ>; d) <https://clck.ru/3GS4Gj>.

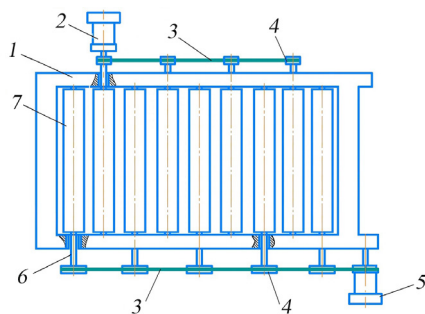
Source: images are taken from source: a) <https://clck.ru/3GS47Z>; b) <https://clck.ru/3GS3tr>; c) <https://clck.ru/3GS3zJ>; d) <https://clck.ru/3GS4Gj>.

Качество очистки корнеплодов повышается при снабжении машины механизмом, который прижимает корнеплод к щеткам. Простейшее устройство представляет собой установленный над щетками лист эластичного материала, например, плотной резины.

Регулировать качество очистки корнеплодов в машинах подобного типа можно, изменяя частоту вращения щеток, их форму и материал щетинок, а также давление прижимного устройства. Следует отметить, что при изменении частоты вращения щеток кроме качества очистки корнеплодов меняется и пропускная способность устройства. Замена самих щеток вызывает дополнительные затраты денежных средств. Рост давления прижимающего устройства повышает качество очистки, но при этом увеличивается повреждаемость корнеплодов. Поэтому перспективными следует считать очистители корнеплодов, в которых качество очистки не связано с изменением пропускной способности машины.

Материалы и методы. Для улучшения качества очистки корнеплодов от загрязнений в Ульяновском аграрном университете разработан инновационный очиститель, основным рабочим органом которого является роликовый транспортер [17–19]. Роликовые транспортеры (рольганги), содержат установленные на раме параллельно друг другу с зазором и с возможностью вращения в подшипниках ролики. Ролики приводных рольгангов получают вращение обычно от электродвигателя через передачу определенного типа (цепную, ременную и т. д.) [20]. Транспортирование происходит за счет сил трения, возникающих между нижней поверхностью перемещаемых предметов и поверхностью вращающихся роликов. Рольганги характеризует высокая пропускная способность и минимальный риск повреждения транспортируемых грузов.

Принципиальной отличительной особенностью разработанного очистителя (рис. 3) является придание смежным роликам возможности вращения с различной частотой. Для этого четные и нечетные ролики приводятся во вращение с разных сторон транспортера. Используя инверторные электродвигатели или сменные звездочки с разным числом зубьев, можно задать роликам как разную частоту вращения, так и изменять разность частот вращения между соседними роликами. Это позволяет, в зависимости от степени загрязнения исходного материала, либо обеспечить большую пропускную способность очистителя, либо улучшить качество очистки корнеплодов.



Р и с. 3. Очиститель корнеплодов:

1 – рама; 2 – привод четных роликов; 3 – цепи; 4 – звездочки;
5 – привод нечетных роликов; 6 – вал; 7 – ролики

Fig. 3. Root crop cleaner:

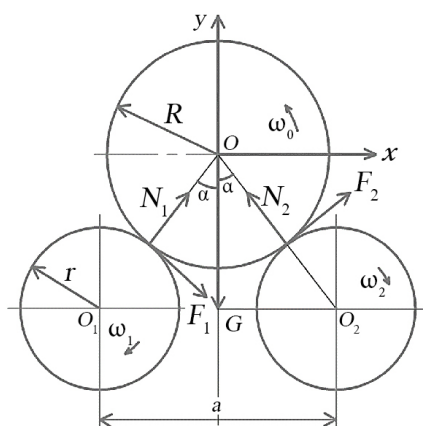
1 – frame; 2 – even roller drive; 3 – chains; 4 – sprockets; 5 – odd roller drive; 6 – shaft; 7 – rollers

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article.

В качестве исследуемого материала был принят картофель сорта Гала со средней массой клубней 0,071–0,122 кг и преимущественно продолговатой формой. При движении по основному рабочему органу клубень ориентируется длинной стороной параллельно роликам очистителя и за счет сил трения получает вращение, частота которого зависит как от коэффициента трения между клубнем и роликом, так и от разности частот вращения смежных роликов. Качество очистки клубней зависит от времени прохождения клубня через основной рабочий орган, частоты вращения клубня и упомянутого выше коэффициента трения [21; 22].

Рассмотрим движение клубня картофеля по двум роликам очистителя. С определенным допущением примем поперечное сечение перемещаемого корнеплода в виде окружности. Тогда элемент клубня малой толщины можно представить в виде диска, который получает вращение при соприкосновении с вращающимися роликами (рис. 4).



Р и с. 4. Силы, действующие на диск при его расположении на вращающихся роликах

F i g. 4. Forces acting on the disk when it is located on rotating rollers

Вначале рассмотрим условие, при котором угловая скорость вращения роликов $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. Коэффициент трения диска о ролик равен μ . Определим время, за которое диск начнет вращаться с той же линейной скоростью, что и ролики в точке касания с диском при условии его движения без скольжения.

На диск действует сила тяжести $G = mg$, реакции поверхности роликов N_1 и N_2 , силы трения *между* роликами и диском F_1 и F_2 соответственно (рис. 4). Линии действия силы тяжести и сил реакции валиков проходят через ось вращения диска, поэтому момент этих сил относительно этой оси равен нулю. Следовательно, угловое ускорение диска обусловлено моментами сил трения.

Запишем уравнение вращательного движения диска:

$$I \frac{d\omega}{dt} = R(F_1 + F_2), \quad (1)$$

где $I = 0,5 mR^2$ – момент инерции диска относительно оси вращения, кг м²; m – масса диска, кг; R – радиус диска, м.

Силы трения F_1 и F_2 определяются реакциями роликов на диск:

$$F_1 = \mu_1 N_1 \quad \text{и} \quad F_2 = \mu_2 N_2, \quad (2)$$

где μ_1, μ_2 – коэффициенты трения диска о первый и второй ролики соответственно.

Силы реакции роликов N_1 и N_2 найдем из равенства нулю суммы проекций сил на вертикальную ось Oy :

$$N_1 \cos \alpha + N_2 \cos \alpha + F_1 \sin \alpha - F_2 \sin \alpha - mg = 0; \quad (3)$$

$$N_1 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha + F_1 \cos \alpha + F_2 \cos \alpha = 0. \quad (4)$$

Подставив в уравнения (3) и (4) значения F_1 и F_2 , соответственно получим:

$$N_1 \cos \alpha + N_2 \cos \alpha + \mu_1 N_1 \sin \alpha - \mu_2 N_2 \sin \alpha - mg = 0; \quad (5)$$

$$N_1 \sin \alpha - N_2 \sin \alpha + \mu_1 N_1 \cos \alpha + \mu_2 N_2 \cos \alpha = 0. \quad (6)$$

Решив систему уравнений (5) и (6), найдем реакции роликов:

$$N_1 = \frac{mg(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha)}{\cos \alpha [(\mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha)]}; \quad (7)$$

$$N_2 = \frac{mg(\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)}{\cos \alpha [(\mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha)]}. \quad (8)$$

Подставив полученные выражения в дифференциальное уравнение (1), получим:

$$\frac{mR^2}{2} \frac{d\omega}{dt} = \frac{mRg(2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)\operatorname{tg} \alpha)}{\cos \alpha [(\mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha)]} \quad (9)$$

или

$$\int_0^{\omega_0} d\omega = \frac{2}{R} \int_0^t \frac{g(2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)\operatorname{tg} \alpha) dt}{\cos \alpha [(\mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha)]}. \quad (10)$$

Проинтегрировав формулу (10), получим:

$$\omega_0 = \frac{2g(2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)\operatorname{tg} \alpha)t}{R \cdot \cos \alpha [(\mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha)]}. \quad (11)$$

С учетом принятых допущений линейная скорость точки ролика в месте его касания с диском является постоянной величиной $v = \omega_1 r$ и равна линейной скорости вращения диска, тогда угловая скорость вращения диска:

$$\omega_0 = v / R = \omega_1 r / R, \quad (12)$$

где r – радиус ролика, м.

Из выражений (11), (12) получим время, в течение которого точка касания диска с роликом достигает линейной скорости ролика в точке его касания с диском:

$$t = \frac{\omega_1 r \cdot \cos \alpha \left[(\mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu_2 - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu_1)(1 - \mu_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha) \right]}{2g(2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)\operatorname{tg} \alpha)}. \quad (13)$$

В случае равенства коэффициентов $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ получим:

$$t = \frac{\omega_1 r \cdot \cos \alpha \left[(\mu \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1)(\mu - \operatorname{tg} \alpha) + (\operatorname{tg} \alpha + \mu)(1 - \mu \cdot \operatorname{tg} \alpha) \right]}{4g(\mu^2 + \mu \cdot \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (14)$$

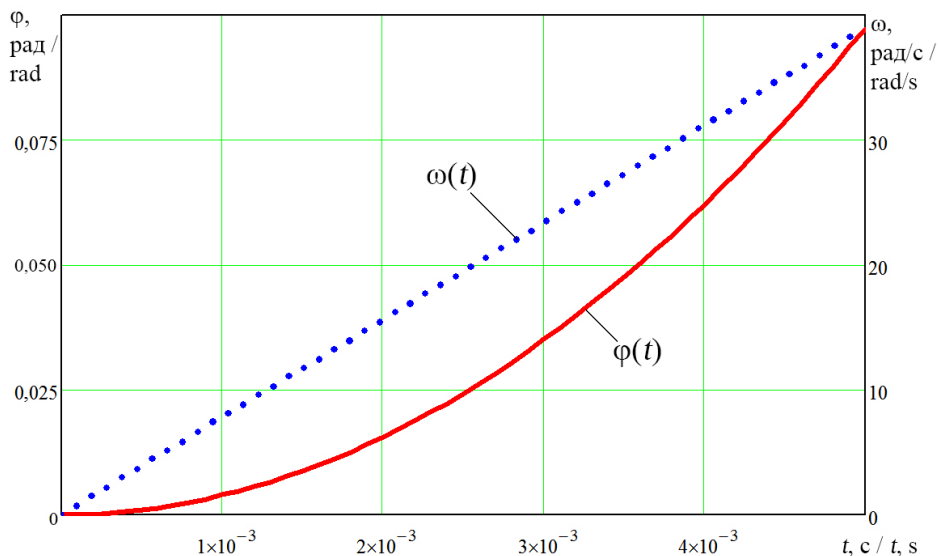
Коэффициент трения диска о вращающиеся обрешиненные ролики, принятый по усредненным данным, равен $\mu = 0,51$.

Используя обозначения, указанные на рисунке 4, выразим угол α :

$$\alpha = \arcsin \frac{a}{2(R+r)}. \quad (15)$$

Результаты исследования. Рассмотрим вращение диска радиусом $R = 0,027$ м (соответствующего средним размерам клубня картофеля), находящегося на вращающихся роликах радиусом $r = 0,04$ м с расстоянием между их центрами $a = 0,09$ м. Примем одинаковой частоту вращения роликов -4 с^{-1} . Угол α при указанных выше значениях конструктивных параметров $\approx 42^\circ$.

Изменения углового перемещения $\varphi(t)$ и угловой скорости $\omega(t)$ диска в зависимости от времени его нахождения на вращающихся роликах до достижения им линейной скорости вращения ролика приведены на рисунке 5.

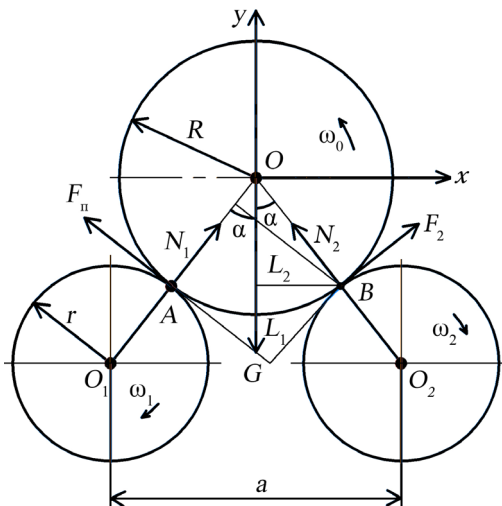


Р и с. 5. Зависимость углового перемещения $\varphi(t)$ и угловой скорости $\omega(t)$ диска, находящегося на вращающихся роликах

F i g. 5. Dependence of angular displacement $\varphi(t)$ and angular velocity $\omega(t)$ of a disk located on rotating rollers

Следовательно, точка на поверхности диска при отсутствии проскальзывания почти мгновенно приобретает скорость поверхности ролика.

Когда угловые скорости вращения роликов разные и $\omega_1 \neq \omega_2$, между одним из роликов и диском возникает проскальзывание (рис. 6).



Р и с. 6. Силы, действующие на диск при его нахождении на роликах, вращающихся с разными угловыми скоростями

F i g. 6. Forces acting on a disk when it is on rollers rotating at different angular velocities

Коэффициент трения диска о ролик при проскальзывании $\mu_c = \mu_1$ зависит от угловой скорости вращения ролика и при снижении частоты вращения ролика μ_c уменьшается. При увеличении частоты вращения ролика коэффициент μ_c увеличивается, но при дальнейшем увеличении частоты μ_c почти не изменяется.

При проскальзывании возникает сила трения между роликом и диском, создающая момент сил, заставляющий диск вращаться относительно точки касания диска со вторым роликом и перемещать его по второму ролику.

Из рисунка 6 следует, что сила трения ролика о кореньплод F_n в точке А создает момент относительно точки В, который направлен по часовой стрелке:

$$M_1 = F_n l_1 = F_n (R - R \cos 2\alpha) = \mu_1 N_1 R (1 - \cos 2\alpha).$$

Сила тяжести $G = mg$ создает момент, направленный против часовой стрелки относительно точки В:

$$M_2 = G l_2 = mgR \cdot \sin \alpha.$$

Чтобы диск перемещался по второму ролику, необходимо: $M_1 > M_2$.

Подставив значения M_1 и M_2 , получим:

$$\mu_1 N_1 R (1 - \cos 2\alpha) > mgR \cdot \sin \alpha. \quad (16)$$

Из неравенства (16) следует, что коэффициент трения должен удовлетворять условию:

$$\mu_1 > \frac{mgR \cdot \sin \alpha}{N_1 R (1 - \cos 2\alpha)}.$$

Учитывая условие, получим:

$$N_1 = \frac{mg}{\cos \alpha (2 + \mu)}.$$

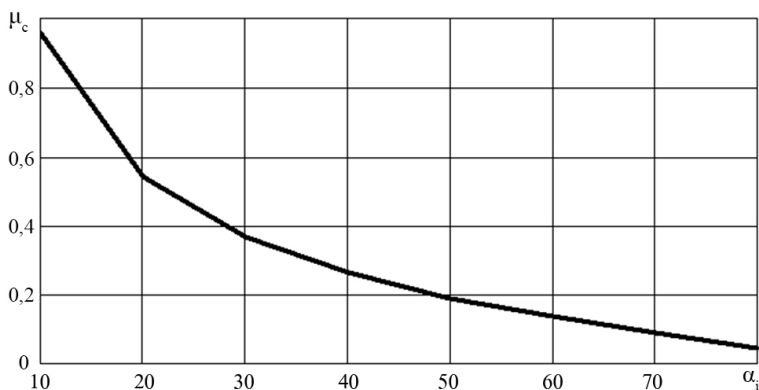
После подстановки получим следующее неравенство:

$$\mu_1 (2 + \mu_1) > \frac{\sin 2\alpha}{2(1 - \cos 2\alpha)}. \quad (17)$$

Решив неравенство (17) относительно α , получим:

$$\alpha > \arctg \frac{1}{2\mu_1(\mu_1 + 2)} \quad (18)$$

Изменение коэффициента трения скольжения на первом ролике в зависимости от угла α приведено на рисунке 7.



Р и с. 7. Зависимость коэффициента трения скольжения от угла α
F i g. 7. Dependence of the coefficient of sliding friction on the angle α

Однако коэффициент трения скольжения μ зависит еще и от линейной скорости поверхности ролика, с которой соприкасается клубень, поэтому характер изменения μ при работе очистителя отличается от зависимости, приведенной на рисунке 7.

Приравняем между собой выражения (15) и (18) для случая, когда материал роликов одинаков, а коэффициенты трения клубней по ним равны между собой:

$$\arcsin \frac{a}{2(R+r)} = \arctg \frac{1}{2\mu(\mu + 2)}. \quad (19)$$

Выразим из формулы (19) расстояние между центрами смежных роликов:

$$a = \frac{2(R+r) \cdot \text{sign}[\mu(\mu+2)]}{\sqrt{4\mu^4 + 16\mu^3 + 16\mu^2 + 1}}$$

Так как коэффициент μ всегда больше нуля, то $\text{sign}[\mu(\mu+2)] = 1$. С учетом этого можно записать:

$$a = 2(R+r) / \sqrt{4\mu^4 + 16\mu^3 + 16\mu^2 + 1}. \quad (20)$$

Таким образом, при известных R ($R = 25 \dots 84$ мм) и μ ($\mu = 0,42 \dots 0,59$), задавшись диаметром роликов, можно определить расстояние между центрами смежных роликов, которое является одним из основных параметров транспортирующе-очищающего рабочего органа. С учетом физико-механических свойств клубней картофеля и указанных выше аналитических выражений нами принято, что $a = 0,09$ м.

Обсуждение и заключение. Чтобы момент силы трения при скольжении диска по первому ролику относительно точки касания диска со вторым роликом создавал условие перекачивания диска по второму ролику (и следующим за ним) необходимо выполнение неравенства (17). Выражение (19) показывает взаимосвязь между конструктивными параметрами предлагаемого устройства для очистки корнеплодов от загрязнений и физико-механическими свойствами очищаемых корнеплодов.

Проведенные исследования очистителя корнеплодов в лабораторных условиях, основанные на результатах теоретических исследований, показали, что при длине транспортирующе-очищающего рабочего органа 2 м за время 34,4 с можно достичь эффективности очистки ≈ 78 % при оснащении машины 16 роликами и соотношении частот вращения нечетных и четных роликов 220/250 мин⁻¹. Большой эффективности очистки корнеплодов на жестких резиновых роликах достичь почти невозможно вследствие отклонения формы корнеплодов от идеальной и наличия на их поверхности выпуклостей и впадин, например, в виде глубоких глазков. При этом остаточная загрязненность корнеплодов не превышала 2,5 %, что полностью соответствует зоотехническим требованиям к их подготовке к скармливанию сельскохозяйственным животным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шамонин В.И., Сергеев А.В., Логинов Г.А. Обоснование режимов работы машины для мойки картофеля и корнеплодов. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2018;3(52):231–236. URL: <https://clck.ru/3GXMzk> (дата обращения: 27.09.2024). Shamonin V.I., Sergeev A.V., Loginov G.A. [Justification of the Operating Modes of the Machine for Washing Potatoes and Root Crops]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018;3(52):231–236. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3GXMzk> (accessed 27.09.2024).
2. Сабиев У.К., Хузин И.Р. Анализ машин для очистки корнеклубнеплодов. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2020;2(38):188–195. EDN: RIQOUR Sabiev U.K., Khuzin I.R. Analysis of Root Lifters. *Vestnik Omskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2020;2(38):188–195. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: RIQOUR

3. Сабиев У.К., Хузин И.Р. Безводная очистка корнеклубнеплодов вибрационным воздействием. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2020;4(40):146–151. URL: https://www.omgau.ru/upload/iblock/b27/19_40.pdf (дата обращения: 27.09.2024). Sabiev U.K., Khuzin I.R. Waterless Tuberous Root Cleaning by Means of Vibration. *Vestnik Omskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2020;4(40):146–151. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.omgau.ru/upload/iblock/b27/19_40.pdf (accessed 27.09.2024).
4. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирёв А.В. Результаты исследований процесса очистки клубней картофеля и корнеплодов моркови с использованием ультразвука. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020;2(50):6–14. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-6-14> Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V. Research Results of the Process of Cleaning Potato Tubers and Carrot Root Crops Using Ultrasound. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2020;2(50):6–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-6-14>
5. Джаббаров Н.И., Захаров А.М., Шаблыкин И.Н. Математическая модель и закономерности изменения производительности установки для предреализационной подготовки корнеплодов аэродинамическим способом. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2023;16(1):69–79. EDN: EXEKTY Dzhabbarov N.I., Zakharov A.M., Shablykin I.N. Mathematical Model and Common Patterns of Performance Changes of the Device for Pre-Sale Preparation of Root Crops Through the use of Aerodynamic Method. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2023;16(1):69–79. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: EXEKTY
6. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В. Исследование сепарирующей системы с использованием теплоты отработавших газов двигателя свеклоуборочного комбайна. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022;16(1):19–26. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26> Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V. Study of an Exhaust Gas Heat Separation System for the Beet Harvester. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(1):19–26. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-1-19-26>
7. Кухмазов К.З. Устройство для дополнительной очистки корнеплодов сахарной свеклы. *Нива Поволжья*. 2019;(2):122–128. EDN: XAAOMD Kukhmazov K.Z. Device for Additional Cleaning Root Crops of Sugar Beet. *Niva Povolzhya*. 2019;(2):122–128. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XAAOMD
8. Филитова А.А., Бахареv А.А. Щеточное устройство для повышения эффективности механизированной очистки корнеплодов сахарной свеклы. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018;(3):541–547. EDN: YLTAEP Filitova A.A., Baharev A.A. Brush Device for Increasing the Efficiency of Mechanized Cleaning of Sugar Beet Roots. *Innovations in Agriculture*. 2018;(3):541–547. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YLTAEP
9. Гайдай П.А. Сравнительный анализ устройств для безводной очистки корнеклубнеплодов. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2015;(3):65–69. URL: https://www.omgau.ru/upload/iblock/ebf/19_13.pdf (дата обращения: 25.09.2024). Gayday P.A. Comparative Analysis Devices for Waterless Cleaning Root Crops. *Vestnik Omskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2015;(3):65–69. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.omgau.ru/upload/iblock/ebf/19_13.pdf (accessed 25.09.2024).
10. Шуханов С.Н. Повышение эффективности машин для сухой очистки корнеплодов. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2016;(2):13–14. EDN: LBCXUS Shukhanov S.N. Improving the Efficiency of Machines for Dry Cleaning of Root Crops. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2016;(2):13–14. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: LBCXUS
11. Карпов В.В., Гулевский В.А. Анализ взаимодействия рабочих органов гофрощеточных барабанов очистителя кормовых корнеплодов с объектами очистки. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2017;(2):121–128. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.2.121>

- Karpov V.V., Gulevsky V.A. Analysis of the Interaction of the Working Bodies of the Corrugated Brush Drums of the Cleaner of Forage Root Crops with the Cleaning Objects. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2017;(2):121–128. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.2.121>
12. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В. Результаты поисковых исследований сепарирующей системы при очистке корнеплодов сахарной свеклы. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021;(1):13–18. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-1-13-18>
Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibiryov A.V. Results of Exploratory Research of the Separating System when Cleaning Sugar Beet Root. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2021;(1):13–18. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-1-13-18>
 13. Lü J., Shang Q., Yang Y., Li Z., Li J., Liu Z. Design Optimization and Experiment on Potato Haulm Cutter. *Transactions of the CSAM*. 2016;47(5):106–114. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015>
 14. Dongre A.U., Battase R., Dudhale S., Patil V.R., Chavan D. Development of Potato Harvesting Model. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(10):1567–1570. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V4/I10/IRJET-V4I10288.pdf> (accessed 25.09.2024).
 15. Захаров А.М. Разработка барабанно-роликового очистителя корнеклубнеплодов. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2019;6-1(84):44–47. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.84.6.008>
Zakharov A.M. Development of Drum-Roller Tuberous Root Cleaner. *International Research Journal*. 2019;6-1(84):44–47. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.84.6.008>
 16. Сибирёв А.В., Мосяков М.А., Сазонов Н.В., Мансуров А.П., Лобачевский Я.П. Энергосберегающая технология уборки корнеплодов и картофеля. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2024;(4):107–112. URL: <https://www.vestnik-rsn.ru/vrsn/issue/view/61> (дата обращения: 27.09.2024).
Sibirev A.V., Mosyakov M.A., Sazonov N.V., Mansurov A.P., Lobachevsky Ya.P. Energy-Saving Technology for Harvesting Root Crops and Potatoes. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2024;(4):107–112. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.vestnik-rsn.ru/vrsn/issue/view/61> (accessed 27.09.2024).
 17. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А., Сергеев А.В. Очиститель корнеплодов от почвы. Патент 187599 Российская Федерация. 13 марта 2019. EDN: **RZLANW**
Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Sergeev A.V. [Soil Remover for Root Crops]. Patent 187599 Russian Federation. 2019 March 13. (In Russ.) EDN: **RZLANW**
 18. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А., Сергеев А.В. Очиститель корнеплодов от почвы. Патент 187652 Российская Федерация. 14 марта 2019. EDN: **HGTWOT**
Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Sergeev A.V. [Soil Remover for Root Crops]. Patent 187652 Russian Federation. 2019 March 14. (In Russ.) EDN: **HGTWOT**
 19. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А., Сергеев А.В. Очиститель корнеплодов от почвы. Патент 2705308 Российская Федерация. 6 ноября 2019. EDN: **CVQTHZ**
Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A., Sergeev A.V. Root Crops Soil Cleaner. Patent 2705308 Russian Federation. 2019 November 6. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **CVQTHZ**
 20. Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Горелышев Е.М., Починов В.Д. Очиститель корнеплодов от почвы. Патент 200458 Российская Федерация. 26 октября 2020. EDN: **JGBBQM**
Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Gorelyshev E.M., Pochinov V.D. [Soil Remover for Root Crops]. Patent 200458 Russian Federation. 2020 October 26. (In Russ.) EDN: **JGBBQM**
 21. Mayer V., Vejchar D., Pastorková L. Measurement of Potato Tubers Resistance Against Mechanical Loading. *Research in Agricultural Engineering*. 2008;54(1):22–31. <https://doi.org/10.17221/708-RAE>
 22. Крючкова Л.Г., Доценко С.М., Бурмага А.В., Винокуров С.А., Гончарук О.В. Обоснование способа и параметров процесса сухой очистки корнеплодов для линии приготовления и раздачи кормовых смесей. *АгроЭкоИнфо*. 2017;(3):11. EDN: **ZSGMUD**

Kryuchkova L.G., Dotsenko S.M., Burmaga A.V., Vinokurov S.A., Goncharuk O.V. [Justification of the Method and Parameters of the Dry Cleaning Process of Root Crops for the Line for the Preparation and Distribution of Feed Mixtures]. *AgroEcoInfo*. 2017;(3):11. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZSGMUD

Об авторах:

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой агротехнологий, машин и безопасности жизнедеятельности Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1603-1779>, Researcher ID: F-3816-2019, Scopus ID: 5718840075, SPIN-код: 2823-4234, vova73ulgau@yandex.ru

Исаев Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и физики Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6969-8533>, Scopus ID: 57201581226, SPIN-код: 8845-9914, isurmi@yandex.ru

Павлушин Андрей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры агротехнологий, машин и безопасности жизнедеятельности Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7678-2876>, Researcher ID: O-6051-2017, Scopus ID: 57142406500, SPIN-код: 6080-3209, andrejpavlu@yandex.ru

Горельшев Егор Михайлович, инженер первой категории кафедры безопасности жизнедеятельности и энергетики Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (432017, Российская Федерация, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0974-3879>, SPIN-код: 2859-5060, Acrobat1997@rambler.ru

Заявленный вклад авторов:

В. И. Курдюмов – формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

Ю. М. Исаев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Павлушин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Е. М. Горельшев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 06.12.2024; поступила после рецензирования 25.12.2024;
принята к публикации 13.01.2025

About the authors:

Vladimir I. Kurdyumov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Agricultural Technologies, Machines and Life Safety, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1, Novy Venets Blvd, Ulyanovsk 432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1603-1779>, Researcher ID: F-3816-2019, Scopus ID: 5718840075, SPIN-code: 2823-4234, vova73ulgau@yandex.ru

Yuri M. Isaev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mathematics and Physics, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1, Novy Venets Blvd, Ulyanovsk 432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6969-8533>, Scopus ID: 57201581226, SPIN-code: 8845-9914, isurmi@yandex.ru

Andrey A. Pavlushin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Agricultural Technologies, Machines and Life Safety, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1, Novy Venets Blvd, Ulyanovsk 432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7678-2876>, Researcher ID: O-6051-2017, Scopus ID: 57142406500, SPIN-code: 6080-3209, andrejpavlu@yandex.ru

Egor M. Gorelyshev, Engineer of the First Category of the Department of Life Safety and Energy, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin (1, Novy Venets Blvd, Ulyanovsk 432017, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0974-3879>, SPIN-code: 2859-5060, Acrobat1997@rambler.ru

Authors contribution:

V. I. Kurdyumov – formulating the idea, objectives and aims of the study; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, making comments and corrections by members of the research team including at the pre- and post-publication stages.

Yu. M. Isaev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and the data obtained.

A. A. Pavlushin – conducting the study including performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically writing the draft manuscript including its translation into a foreign language.

E. M. Gorelyshev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript, specifically visualizing the study results and data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 06.12.2024; revised 25.12.2024; accepted 13.01.2025