

## ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЧАСТИЦ ВОРОХА ГРЕЧИХИ НА КАЧЕСТВО ФОТОСЕПАРИРОВАНИЯ

Алексей Михайлович Гиевский<sup>1</sup>  
Константин Васильевич Мяснянкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I  
<sup>2</sup>ЗАО «Техника-Сервис»

Фотоэлектронные сепараторы применяют для сепарации сельскохозяйственного сырья и различных продуктов, в частности при сортировке семян перед посевом, так как позволяют удалять семена с низким коэффициентом всхожести, семена сорных растений, что приводит к увеличению урожайности. Важной составляющей фотосепаратора является лоток, по которому компоненты обрабатываемого материала направляются в зону сканирования. Рассмотрен принцип работы фотосепаратора и представлено математическое описание движения обрабатываемых частиц по скатному лотку. С целью обоснования параметров скатного лотка фотосепаратора для обработки вороха гречихи выполнено математическое описание движения обрабатываемых частиц в фотосепараторе. Для упрощения расчётов рассматривали сплошную однослойную подачу материала на скатный лоток, при этом в расчётах не учитывали сопротивление воздуха и упругие свойства обрабатываемых частиц, признав их несущественными. Также были приняты допущения, что на скатный лоток подаются частицы одинаковой массы и размера. При сплошной подаче материала на лоток крайне сложно контролировать однослойность, поэтому длину лотка лучше принимать максимального значения, при котором интервал между предыдущей и последующей частицами в конце лотка ( $S_{int}$ ) будет больше нуля. В ходе математического моделирования была определена зависимость интервала  $S_{int}$  от разницы в коэффициентах трения частиц по скатной поверхности ( $\Delta f$ ). На примере очистки семян гречихи от обрубленных зерновок приведены графики зависимости  $S_{int}$  от  $\Delta f$ . Установлено, что для повышения качества очистки на фотосепараторе лучше использовать скатный лоток с наименьшим коэффициентом трения обрабатываемых частиц по его поверхности. Выполненное математическое описание движения обрабатываемых частиц в фотосепараторе позволяет не только наглядно отобразить зависимость интервала  $S_{int}$  от разницы коэффициентов трения  $\Delta f$ , но и подобрать максимальную длину лотка, при которой интервал  $S_{int}$  будет больше нуля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фотосепаратор, математическая модель, движение частиц, скатный лоток, зерновки гречихи, длина лотка.

## EFFECT OF FRICTION PROPERTIES OF BUCKWHEAT HEAP PARTICLES ON THE QUALITY OF COLOR SORTING

Alexey M. Gievsky  
Konstantin V. Myasnyankin

<sup>1</sup>Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great  
<sup>2</sup>ZAO Tekhnika-Servis

Color sorters are used for separating agricultural raw materials and various products, particularly when sorting seeds before sowing, since these devices allow removing the seeds with a low germination coefficient and weed seeds, which leads to an increase in yield. An important part of a color sorter is the chute, along which the components of the processed material are supplied to the scanning zone. The authors have considered the principle of operation of a color sorter and presented a mathematical description of the motion of processed particles along the sack chute. In order to substantiate the parameters of the sack chute of a color sorter for processing buckwheat heap, a mathematical description of the motion of processed particles in a color sorter was performed. To simplify the calculations the authors considered a continuous single-layer supply of material to the sack chute, and the calculations did not take into account the air resistance and elastic properties of the processed particles recognizing them as insignificant. It was also assumed that particles supplied to the sack chute were of the same mass and size. When the material is continuously supplied to the tray, it is extremely difficult to control single-layeredness, so it is better to assume the maximum value of chute length, at which the interval between the previous and subsequent particles at the end of the chute ( $S_{int}$ ) will be greater than zero. In the course of mathematical modeling the authors determined the dependence of the  $S_{int}$  interval on the difference in the coefficients of friction of particles on the chute surface ( $\Delta f$ ). Dependence diagrams of  $S_{int}$  versus  $\Delta f$  are shown on the example of cleaning buckwheat seeds from hulled kernels. It is found that to improve the quality of cleaning in a color sorter it is better to use a sack chute with the lowest coefficient of friction of processed particles over its surface. The performed mathematical description of the motion of processed particles in the color sorter allows not only visual displaying of dependence of the  $S_{int}$  interval on the difference in friction coefficients  $\Delta f$ , but also selecting the maximum chute length at which the  $S_{int}$  interval will be greater than zero.

KEYWORDS: color sorter, mathematical model, particle motion, sack chute, buckwheat kernels, chute length.

**В**ведение

Использование машин, работа которых основана на традиционных признаках разделения зерновых смесей на стадии окончательной очистки и сортировки, постепенно вытесняется устройствами, учитывающими различие в цветовых характеристиках, то есть фотоэлектронными сепараторами [1, 3, 10]. Изначально оптическая сортировка применялась в основном в пищевой промышленности на стадии финальной подготовки сырья к переработке или реализации [7].

По мере совершенствования фотосепараторов, оснащения CCD-камерами и сенсорами расширяются их возможности и сфера применения. Они идеально подходят для сортировки семян, так как удаляют не только семена сорных растений, но и семена основной культуры с низкой всхожестью, имеющие незначительные отличия не только в цветовых характеристиках [5, 6, 9, 11].

Фотосепараторы оказывают минимальное механическое воздействие на обрабатываемый материал, что имеет немаловажное значение при подготовке семян легкоповреждаемых культур, в том числе и гречихи [8].

Принципиальная схема работы фотосепаратора представлена на рисунке 1. Очищаемый продукт загружается в бункер 1. Лоток вибропитателя 2, приводимый в движение виброприводом 3, совершает колебания. При этом обрабатываемые компоненты движутся на наклонный скатный лоток 4, где они разгоняются и направляются в зону сканирования камерами 5. При обнаружении дефектов воздушным импульсом пневмоэжектора 6 происходит выделение примеси в отсек для сбора отходовой фракции 7. Годный продукт продолжает полёт со скатного лотка в приёмник очищенной фракции 8. По завершении работы выключают вибропривод 3, и подача материала в фотосепараторе прекращается.

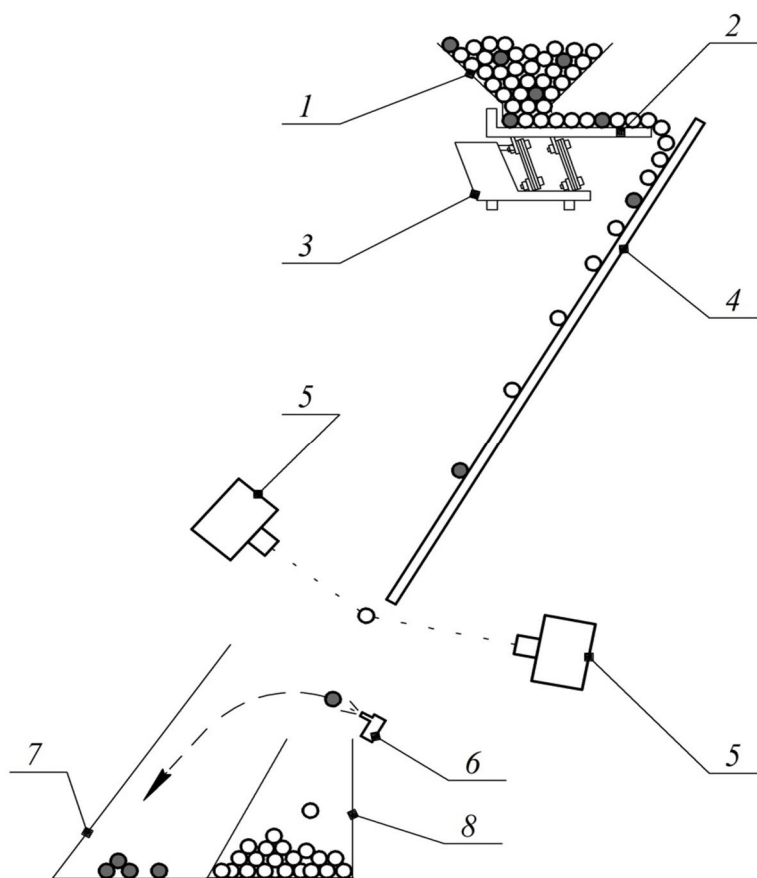


Рис. 1. Принципиальная схема фотосепаратора: 1 – бункер; 2 – лоток вибропитателя; 3 – вибропривод; 4 – наклонный скатный лоток; 5 – камеры; 6 – пневмоэжектор; 7 – отсек для сбора отходовой фракции (примесей); 8 – отсек для сбора очищенного продукта

Как следует из приведённой на рисунке 1 схемы, если частицы со скатного лотка будут сходиться не по одной, то велика вероятность создания помех при распознавании дефектов. При этом во время выбраковки примеси частица (годная), следующая за дефектной частицей или вместе с ней, может попасть в поле действия воздушного импульса, то есть возможны потери годного продукта. Из этого следует, что для минимизирования нарушений распознавания дефектов и потерь при выбраковке необходимо, чтобы компоненты сходили со скатного лотка только однослойным потоком с некоторым интервалом, то есть чтобы между предыдущей и последующей частицами в конце лотка был бы хоть какой-то интервал. Для этого подавать материал на скатный лоток нужно однослойным потоком, иначе однослойность схода частиц с лотка 4 не может быть гарантирована. При однослойной подаче на скатный лоток максимальная производительность будет обеспечиваться при сплошной однослойной подаче.

### Материалы и методы

С целью обоснования параметров скатного лотка фотосепаратора для обработки вороха гречихи выполнено математическое описание движения обрабатываемых частиц в фотосепараторе. Для упрощения расчётов рассматривали сплошную однослойную подачу материала на скатный лоток, при этом в расчётах не учитывали сопротивление воздуха и упругие свойства обрабатываемых частиц, признав их несущественными. Также были приняты допущения, что на скатный лоток подаются частицы одинаковой массы и размера.

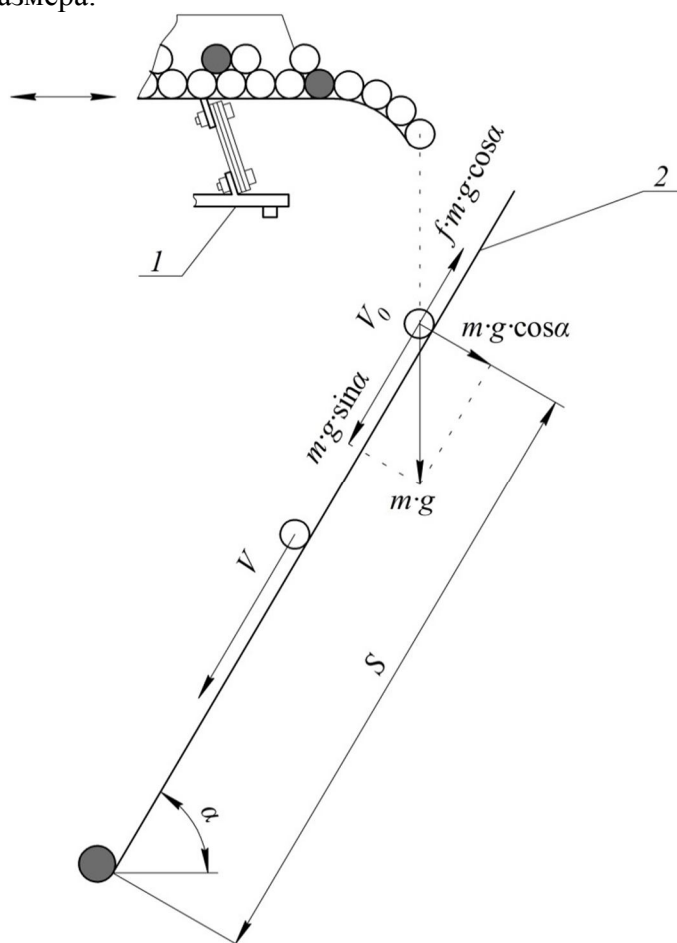


Рис. 2. Расчётная схема: 1 – вибропитатель фотосепаратора; 2 – скатный лоток;  $\alpha$  – угол установки скатного лотка к горизонту, °;  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81$ ), м/с<sup>2</sup>;  $m$  – масса обрабатываемых частиц, кг;  $f$  – коэффициент трения частицы по скатной поверхности;  $V_0$  – начальная скорость частиц на скатном лотке, м/с;  $V$  – скорость движения частицы по наклонной плоскости, м/с;  $S$  – путь обрабатываемых частиц по скатному лотку, м

Для описания движения компонентов по скатному лотку рассмотрим рисунок 2 и применим известное выражение [2]:

$$\frac{dV}{dt} = g \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (1)$$

где  $V$  – скорость движения частицы по наклонной плоскости, м/с;

$t$  – время движения частицы по скатному лотку, с;

$g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81$ ), м/с<sup>2</sup>;

$\alpha$  – угол наклона плоскости (скатного лотка) к горизонту, °;

$f$  – коэффициент трения частицы по скатной поверхности.

Для упрощения обозначим

$$g \cdot \sin \alpha - g \cdot f \cdot \cos \alpha = A. \quad (2)$$

Тогда для предыдущей и последующей частиц уравнение (2) будет иметь вид:

$$A_1 = g \cdot \sin \alpha - g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha; \quad (3)$$

$$A_2 = g \cdot \sin \alpha - g \cdot f_2 \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – коэффициенты трения соответственно предыдущей и последующей частиц по скатной поверхности.

При одинаковых коэффициентах трения  $f_1$  и  $f_2$  или если предыдущая частица будет иметь меньший коэффициент трения по скатному лотку ( $f_1$ ), чем последующая за ней частица ( $f_2$ ), интервал между ними в ходе их движения по скатному лотку будет увеличиваться, так как в фотосепараторе угол установки скатного лотка ( $\alpha$ ) больше угла трения обрабатываемых частиц по его поверхности. Когда  $f_1 > f_2$ , интервал между предыдущей и последующей частицами на лотке может сокращаться, это значит, что возможны нарушения при распознавании дефектов и потери при выбраковке примесей, поэтому рассмотрим случай, когда  $f_1 > f_2$  является худшим из возможных вариантов.

Так как время движения предыдущей и последующей частиц с момента их попадания на скатный лоток до его края будет отличаться (из-за разных  $f_1$  и  $f_2$ ), то скорости их движения на лотке будут находиться при помощи следующих выражений:

$$V_1 = V_0 + A_1 \cdot t; \quad (5)$$

$$V_2 = V_0 + A_2 \cdot (t - t_0), \quad (6)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – скорости движения по скатному лотку соответственно предыдущей и последующей частиц, м/с;

$V_0$  – начальная скорость частиц на скатном лотке, м/с;

$t$  – время движения предыдущей частицы по лотку, с;

$t_0$  – время, через которое на скатный лоток поступает каждая последующая частица, с.

При сплошной однослойной подаче компонентов обрабатываемого материала на скатный лоток время  $t_0$  можно найти при помощи уравнения

$$t_0 = \frac{\sqrt{V_0 + 2 \cdot A_1 \cdot b} - V_0}{A_1}, \quad (7)$$

где  $b$  – размер обрабатываемых частиц, м.

Путь предыдущей и последующей частиц по скатному лотку одинаковый и может быть найден из следующих выражений:

$$S = V_0 \cdot t_1 + \frac{A_1 \cdot t_1^2}{2}; \quad (8)$$

$$S = V_0 \cdot t_2 + \frac{A_1 \cdot t_2^2}{2}, \quad (9)$$

где  $S$  – путь обрабатываемых частиц по скатному лотку, м;

$t_1$  и  $t_2$  – время прохождения предыдущей и последующей частиц пути  $S$ , с.

Величина  $S$ , как правило, известна, поэтому  $t_1$  и  $t_2$  можно определить, решив уравнения (8) и (9):

$$t_1 = \frac{\sqrt{V_0^2 + 2 \cdot A_1 \cdot S} - V_0}{A_1}; \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{V_0^2 + 2 \cdot A_2 \cdot S} - V_0}{A_2}. \quad (11)$$

Путь, пройденный частицами по лотку за какой-то промежуток времени, можно найти из выражений:

$$S_1 = V_0 \cdot t + \frac{A_1 \cdot t^2}{2}; \quad (12)$$

$$S_2 = V_0 \cdot (t - t_0) + \frac{A_2 \cdot (t - t_0)^2}{2}, \quad (13)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – путь, пройденный предыдущей и последующей частицами по скатному лотку за какой-то промежуток времени  $t$ , м.

Для определения интервала между предыдущей и последующей частицами в конце скатного лотка необходимо в уравнение (13) подставить  $t_1$  вместо  $t$  и вычесть полученное выражение из уравнения (8). В итоге получим следующее равенство:

$$S_{\text{int}} = V_0 \cdot t_0 + \frac{A_1 \cdot t_1^2}{2} - \frac{A_2 \cdot (t_1 - t_0)^2}{2}, \quad (14)$$

где  $S_{\text{int}}$  – интервал между предыдущей и последующей частицами в конце скатного лотка, м.

### **Результаты и их обсуждение**

Вышеприведённая математическая модель позволяет получить графические зависимости интервала между частицами вороха гречихи в конце скатного лотка от значений коэффициентов трения и разницы коэффициентов трения зерновок по лотку. Для этого примем коэффициент трения предыдущей частицы (обрушенной зерновки гречихи – примеси при подготовке семян, которую нужно выделить) в пределах 0,36...0,43, а последующей частицы (полноценной зерновки гречихи – годного продукта при подготовке семян) – 0,30...0,40 [4].

Допустим, что угол установки скатного лотка  $\alpha = 60^\circ$ , размер обрабатываемых частиц  $b = 0,005$  м, начальная скорость частиц на скатном лотке  $V_0 = 0,95$  м/с, а путь  $S = 1$  м. Зафиксируем крайние и одно из средних значений коэффициента трения предыдущей частицы по скатной поверхности из принятого интервала (например,  $f_{1.1} = 0,43$ ,  $f_{1.2} = 0,39$  и  $f_{1.3} = 0,36$ ) и будем изменять коэффициент трения последующей частицы, увеличивая разницу между ними ( $\Delta f$ ) от 0 до 0,045 с шагом 0,005.

Разница  $\Delta f$  определяется из следующего выражения:

$$\Delta f = f_1 - f_2, \quad (15)$$

где  $\Delta f$  – разница между коэффициентами трения предыдущей и последующей частиц по скатной поверхности.

Вычитая  $\Delta f$  из фиксированных значений  $f_{1.1}$ ,  $f_{1.2}$  и  $f_{1.3}$ , получим соответствующие значения коэффициента трения последующей частицы по скатной поверхности ( $f_{2.1}$ ,  $f_{2.2}$  и  $f_{2.3}$ ). Подставляя различные значения  $f_{1.1}$ ,  $f_{2.1}$ ;  $f_{1.2}$ ,  $f_{2.2}$ ;  $f_{1.3}$  и  $f_{2.3}$  в вышеописанную математическую модель, можно вычислить различные значения интервала  $S_{\text{int}}$  при помощи уравнения (14). Результаты позволяют изобразить графически зависимость интервала  $S_{\text{int}}$  от разницы в коэффициентах трения частиц  $\Delta f$ , которая приведена на рисунке 3.

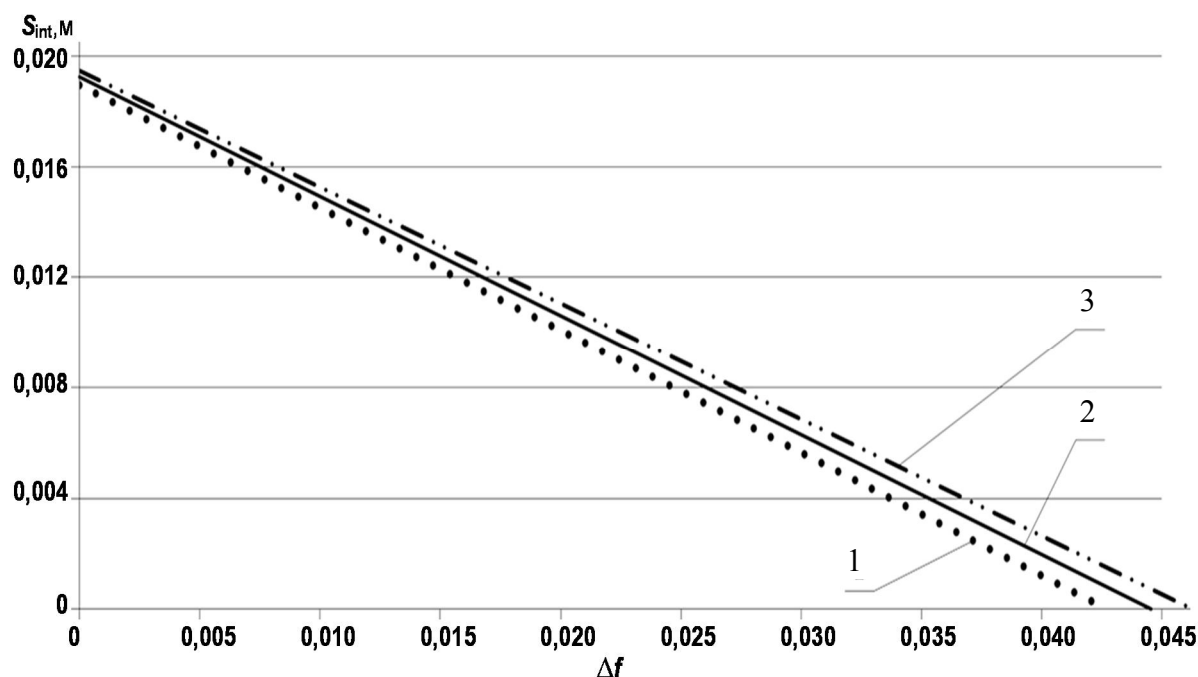


Рис. 3. Зависимость интервала  $S_{int}$  от разницы в коэффициентах трения частиц по скатной поверхности:  $S_{int}$  – интервал между предыдущей и последующими частицами в конце скатного лотка, м;  $\Delta f$  – разность между коэффициентами трения предыдущей и последующей частиц по скатной поверхности; 1 –  $f_{1,1} = 0,43$ ; 2 –  $f_{1,2} = 0,39$ ; 3 –  $f_{1,3} = 0,36$

Анализ графических зависимостей, приведённых на рисунке 3, показывает, что с увеличением разницы  $\Delta f$  снижается интервал  $S_{int}$ , причём при  $\Delta f > 0,04$   $S_{int}$  приближается к нулю, то есть возрастает вероятность того, что последующая частица догонит предыдущую к концу скатной поверхности, следовательно, возможны помехи при распознавании дефектов и потери годного продукта при выбраковке примесей.

Из графических зависимостей (рис. 3) также видно, что чем меньше значения коэффициентов трения предыдущей и последующей частиц по скатному лотку, тем больший интервал ( $S_{int}$ ) будет между ними в конце скатного лотка при равных прочих условиях.

При установке сплошной подачи обрабатываемого материала на скатный лоток крайне сложно контролировать однослойность. При нарушении однослойности подачи, если длина лотка будет недостаточной, частицы могут не успеть рассредоточиться, и интервал между ними в конце лотка может отсутствовать, поэтому скатный лоток должен иметь такую максимальную длину, при которой интервал между частицами  $S_{int}$  будет больше нуля.

### Выводы

Для повышения качества фотосепарации следует использовать скатный лоток с наименьшим коэффициентом трения обрабатываемых частиц по его поверхности.

Представленная математическая модель позволяет не только выявить зависимость изменения интервала между предыдущей и последующей обрабатываемыми частицами в конце лотка ( $S_{int}$ ) от разницы их коэффициентов трения по скатной поверхности ( $\Delta f$ ), но и подобрать длину скатной поверхности, при которой  $S_{int} > 0$ , чтобы минимизировать помехи при распознавании дефектов и, как следствие, потери годного продукта при выбраковке примесей.

## Библиографический список

1. Белина И. Фотосепаратор приносит прибыль уже через неделю / И. Белина // Хлебопродукты. – 2012. – № 1. – С. 44–45.
2. Василенко П.М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко, под ред. акад. М.И. Медведева. – Киев : Изд-во Укр. акад. с.-х. наук, 1960. – 283 с.
3. Воронежсельмаш. Революция в зерноочистке // Хлебопродукты. – 2009. – № 8. – С. 39.
4. Всё о зерне. Технологии хранения и переработки. Физические свойства шелушёных и нешелушёных зёрен (часть 1) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://visacon.ru/pererabotka-zerna/378-fizicheskie-svoystva-shelushenyh-i-neshelushenyh-zeren-chast-1.html> (дата обращения: 10.02.2020).
5. Мерчалова М.Э. Семяочистительные агрегаты для получения качественных семян / М.Э. Мерчалова, К.В. Мяснянкин, В.Н. Ожерельев // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения : матер. международной науч.-практ. конф., посвящённой 115-й годовщине со дня рождения проф. Харитончика Ефима Мироновича (Россия, г. Воронеж, 6 апреля 2017 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 79–84.
6. Мерчалова М.Э. Семяочистительный агрегат нового поколения / М.Э. Мерчалова, А.П. Тарасенко, К.В. Мяснянкин // Современные тенденции развития технологий и технических средств в сельском хозяйстве : матер. международной науч.-практ. конф., посвящённой 80-летию А.П. Тарасенко, д-ра техн. наук, заслуженного деятеля науки и техники РФ, проф. кафедры с.-х. машин Воронежского гос. аграрного ун-та им. императора Петра I (Россия, г. Воронеж, 10 января 2017 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – Ч. II. – С. 164–171.
7. Тищенко А.И. Применение фотоэлектронных сепараторов для повышения качества сортировки сыпучих зерновых продуктов / А.И. Тищенко. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 1999. – 168 с.
8. Федотов В.А. Гречиха в России : монография / В.А. Федотов, П.Т. Корольков, С.В. Кадыров. – Воронеж : Истоки, 2009. – 315 с.
9. CSort. Компания CSort – производитель и официальный партнёр ведущих мировых производителей фотосепараторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://csort.ru/technology/photoseparator/> (дата обращения: 10.02.2020).
10. KITTRADE. Фотосепараторы NANTA ACE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kittrade.com.ua/?page=photoseparatori/photoseparatori-nanta> (дата обращения: 10.02.2020).
11. SKIOLD. Установки для сортирования по цвету серии Royal являются быстрыми и удобными в эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://skiold.ru/> (дата обращения: 10.02.2020).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Алексей Михайлович Гиевский – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: [aleksej.gievskij@mail.ru](mailto:aleksej.gievskij@mail.ru).

Константин Васильевич Мяснянкин – инженер-конструктор ЗАО «Техника-Сервис», Россия, г. Воронеж, e-mail: [kot36rus89@mail.ru](mailto:kot36rus89@mail.ru).

Дата поступления в редакцию 13.05.2020

Дата принятия к печати 20.06.2020

## AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Aleksey M. Gievsky, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: [aleksej.gievskij@mail.ru](mailto:aleksej.gievskij@mail.ru).

Konstantin V. Myasnyankin, Constructor Engineer, ZAO Tekhnika-Servis, Russia, Voronezh, e-mail: [kot36rus89@mail.ru](mailto:kot36rus89@mail.ru).

Received May 13, 2020

Accepted after revision June 20, 2020