
ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕМЯОЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА ПО СЕПАРАЦИОННОМУ РЕШЕТУ

Владимир Иванович Оробинский
Владимир Павлович Шацкий
Людмила Ивановна Федулова
Ирина Владимировна Гриднева
Ким Рубенович Казаров

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Из всех технологических операций при возделывании той или иной сельскохозяйственной культуры самой трудоемкой и энергоемкой является послеуборочная обработка. До настоящего времени основными устройствами очистки продовольственного зерна и семенного материала как в нашей стране, так и за рубежом являются зерноочистительные агрегаты и зерносушильные комплексы, в технологических линиях которых устанавливаются зерноочистительные машины российского и зарубежного производства. Получение высококачественных семян сельскохозяйственных культур невозможно без срочного выделения из комбайнового вороха, поступающего на послеуборочную обработку, примесей органического и минерального происхождения и поврежденного зерна. Одним из рабочих органов технологической послеуборочной обработки семенного материала являются вибрационные сепарирующие решета. Для анализа их работы и предложений по конструктивным и геометрическим параметрам необходимо определять кинематику движения частиц зерна. Представлены результаты моделирования процесса движения элемента зернового вороха по колеблющемуся сепарационному решету с учетом потери массы. В силу переменности направления силы трения строятся конечно-разностные аналоги дифференциальных уравнений движения, которые реализуются численными методами. Доказан факт стабилизации движения частиц независимо от их начальной скорости. Решение дифференциальных уравнений относительного движения позволило определить время движения элемента массы по сепарационному решету, а также учесть при этом силы, действующие на элемент зерновой массы, определить скорость движения и время сепарации. Установлено, что частицы зернового вороха достигают конца решета длиной 1,15 м через 3 сек., что дает возможность находить производительность сепарационных установок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: зерновой ворох, зерноочистительная машина, решета, семенной материал, скорость движения, время.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF SEED CLEANING MACHINES BASED ON THE ANALYSIS OF GRAIN HEAP FLOW ALONG THE SEPARATION SCREEN

Vladimir I. Orobinsky
Vladimir P. Shatsky
Ludmila I. Fedulova
Irina V. Gridneva
Kim R. Kazarov

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Post-harvest processing is the most labor-intensive and power-consuming technological operation in crop cultivation. Until now the main devices for cleaning food grains and seeds both in our country and abroad have been the grain cleaning units and grain drying complexes. Their processing lines are equipped with grain cleaning machines of the Russian and foreign origin. Obtaining high-quality seeds of agricultural crops is impossible without immediate isolation of impurities of organic and mineral origin and damaged grain from the combine heap delivered for post-harvest processing. One of the working bodies of technological post-harvest processing of seed material is rep-

resented by vibrating separation screens. For the purpose of analyzing their operation and making proposals for their design and geometric parameters it is necessary to determine the kinematics of movement of grain particles. The authors present the results of simulating the movement of a grain heap element along the oscillating separation screen taking into account the loss of mass. Due to the variability of friction force direction the authors have constructed the finite-difference analogues of differential equations of motion that are realized by numerical methods. The fact of stabilization of motion of particles is proved regardless of their initial flow rate. Solving the differential equations of relative motion allowed determining the time of movement of the mass element along the separation screen, taking into account the forces acting on the element of grain mass, and determining the flow rate and time of separation. It was established that particles of grain heap reach the end of a 1.15 m screen in 3 seconds, which makes it possible to determine the performance of separation units.

KEYWORDS: grain heap, grain cleaning machine, screens, seed material, flow rate, time.

Многочисленными исследованиями установлено, что существенное отрицательное влияние на качество получаемых семян оказывают следующие факторы:

- природно-климатические условия и место расположения сельхозпредприятия;
- нарушение технологии возделывания сельскохозяйственных культур;
- чрезвычайно высокий уровень травмирования семян при уборке и послеуборочной обработке;
- физико-механические свойства зерна убираемой культуры;
- количественные и качественные характеристики комбайнового вороха, поступающего на послеуборочную обработку.

Качественный состав зернового вороха представляет собой механическую смесь, в состав которой входят семена основной культуры, в том числе щуплое и поврежденное зерно, семена различных культурных и сорных растений, а также примеси органического (частицы соломы, растений, колосьев, соломы) и минерального происхождения (песок, комочки земли и др.). Наличие огромного количества примесей в ворохе, поступающем на послеуборочную обработку, создает благоприятные условия для размножения микроорганизмов, ухудшающих как посевные качества семян, так и качественные показатели товарного зерна [1, 2, 12–17, 19].

Фракционная технология обработки зернового вороха позволяет наиболее полно выделить эти компоненты на самой ранней стадии его обработки. Для данной технологии необходимо иметь высокопроизводительные зерноочистительные машины. Производительность технологических линий зерноочистительных агрегатов зерносушильных комплексов зависит от качества работы и производительности машин для послеуборочной обработки, входящих в состав агрегата. Эффективность работы машин для обработки поступающего зернового вороха зависит от их конструктивных и режимных параметров и физико-механических свойств вороха [3–11].

В лаборатории агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета проведены исследования по поиску путей повышения производительности семяочистительной машины на основе анализа движения зернового вороха по сепарационному решету. В качестве объекта исследования был выбран рабочий процесс решетного стана зерноочистительной машины.

Пусть элемент зерновой массы движется по сепарационному решету, образуя с горизонтом угол α и совершающему колебания вида $z = r \sin \omega t$ (рис. 1) [18].

При этом на элемент зерновой массы действуют следующие силы:

- вес – mg ;
- переносная сила инерции – $F_{ин} = mr\omega^2 \sin \omega t$;
- нормальная реакция – $N = mg \cos \alpha + mr\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha$;
- сила трения – $F_{тр} = fN = f(mg \cos \alpha + mr\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha)$.

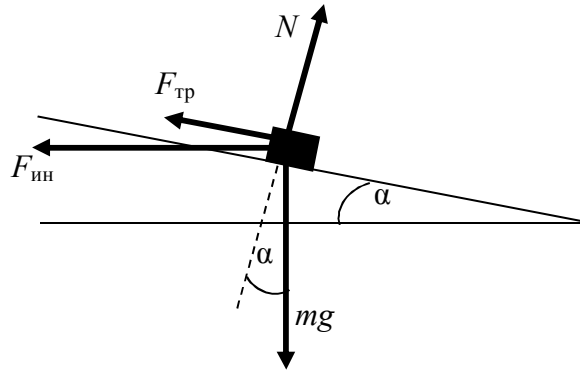


Рис. 1. Схема сил, действующих на элемент зерновой массы при движении по решетке

Абсолютное движение элемента зерновой массы в проекции на ось, совпадающей с направлением наклонной плоскости, моделируется теоремой об изменении количества движения

$$\frac{d(mv)}{dt} = mg \sin \alpha \mp f(mg \cos \alpha + m\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha). \quad (1)$$

В зависимости от направления относительной скорости движения элемента массы определяется знак силы трения. После дифференцирования получим

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \alpha \mp f(mg \cos \alpha + m\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha) - \frac{dm}{dt} v. \quad (2)$$

Отметим, что в процессе движения по поверхности решета масса элемента убывает и изменяется по закону

$$m = m_0 e^{-\mu x},$$

где m_0 – исходная масса элемента вороха;

μ – коэффициент сепарации, 1/м;

x – координата по направлению движения.

$$\text{Тогда } \frac{dm}{dt} = -m_0 \mu e^{-\mu x} \cdot \frac{dx}{dt} = -m_0 \mu e^{-\mu x} \cdot v.$$

Подставив последние соотношения в уравнение (2), получим

$$\frac{dv}{dt} = g \sin \alpha \mp f(g \cos \alpha + r\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha) + \mu v^2. \quad (3)$$

Начальное условие $v(0) = v_0$ замыкает полученную задачу Коши.

Учитывая, что в зависимости от знака относительной скорости элемента массы будет меняться как величина нормальной реакции, так и направление силы трения, данную задачу будем решать методом пошагового движения с использованием алгебраических конечно-разностных уравнений.

$$\text{Производная } \frac{dv}{dt} \text{ представляется в виде } \frac{dv}{dt} \approx \frac{v(t_{i+1}) - v(t_i)}{h},$$

где $h = t_{i+1} - t_i$ – временной шаг.

Тогда уравнение (3) примет вид

$$\frac{v(t_{i+1}) - v(t_i)}{h} = g \sin \alpha \mp f(g \cos \alpha + r\omega^2 \sin \omega t_i \cdot \sin \alpha) + \mu v(t_i)^2,$$

или

$$v(t_{i+1}) = v(t_i) + h \left[g \sin \alpha \mp f(g \cos \alpha + r\omega^2 \sin \omega t_i \cdot \sin \alpha) + \mu v(t_i)^2 \right]. \quad (4)$$

Относительная скорость элемента массы равняется разности абсолютной скорости и проекции переносной скорости на направление движения: $v(t_i) - r\omega \cos \omega t_i \cdot \cos \alpha$. Если относительная скорость больше нуля, то уравнение (4) решается с отрицательным знаком, если меньше нуля, то – с положительным знаком. Численную реализацию этой задачи будем проводить при $r = 0,015$ м, $\omega = 40$ с⁻¹, $\alpha = 9^\circ$, $h = 0,0002$ с, $\mu = 0,25$ 1/м, $g = 9,81$ м/с².

На первом шаге определяется величина нормальной реакции:

$$N = mg \cos \alpha + mr\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha \quad (\text{рис. 2}).$$

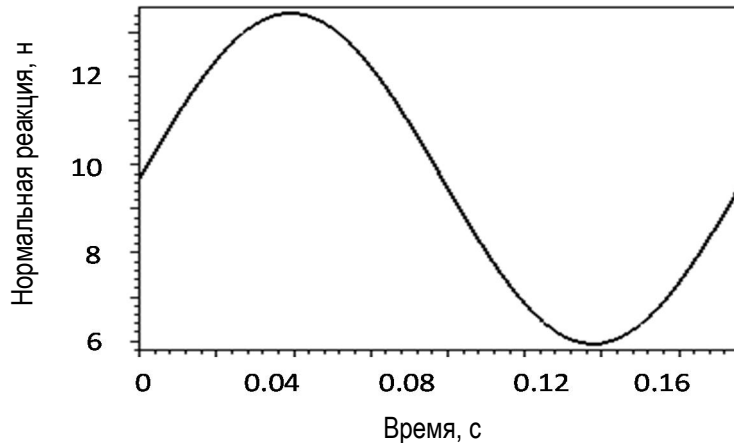


Рис. 2. Изменение нормальной реакции за период колебаний

На рисунке 2 видно, что нормальная реакция остается положительной за все время движения, что исключает возможность отрыва частиц от сепарирующей поверхности.

Далее, в сочетании с условным оператором, проверяющим знак относительной скорости движения, строится оператор цикла, который в каждой точке временного шага последовательно определяет абсолютную скорость движения элемента зерновой массы.

Зависимость абсолютной скорости от времени при условии $v(0) = 0,3$ м/с представлена на рисунке 3.

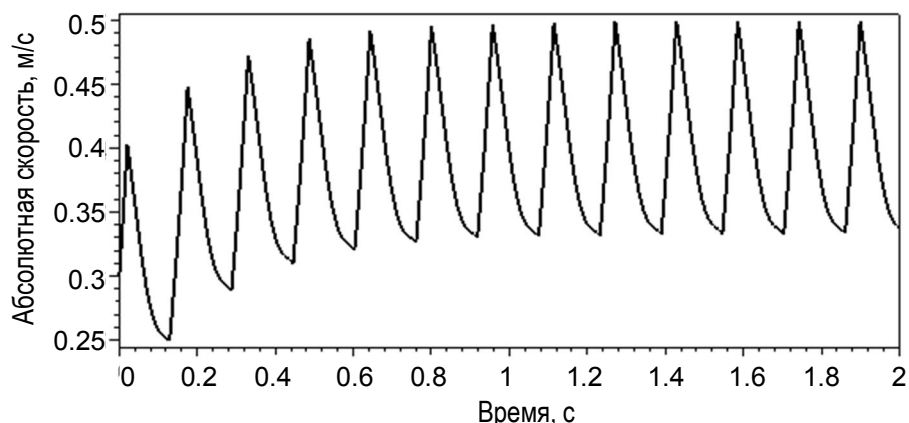


Рис. 3. Зависимость абсолютной скорости движения от времени

Как видно из графика, представленного на рисунке 3, через промежуток времени менее 1 секунды, скорость стабилизируется в диапазон 0,33–0,5 м/с. Достаточно интересным является тот факт, что этот диапазон не зависит от начальной скорости движения.

На рисунке 4 представлена зависимость абсолютной скорости от времени при $v(0) = 0,7$ м/с. Из этого графика видно, что через 0,5 секунды абсолютная скорость стабилизируется в том же диапазоне, как и на рисунке 3.

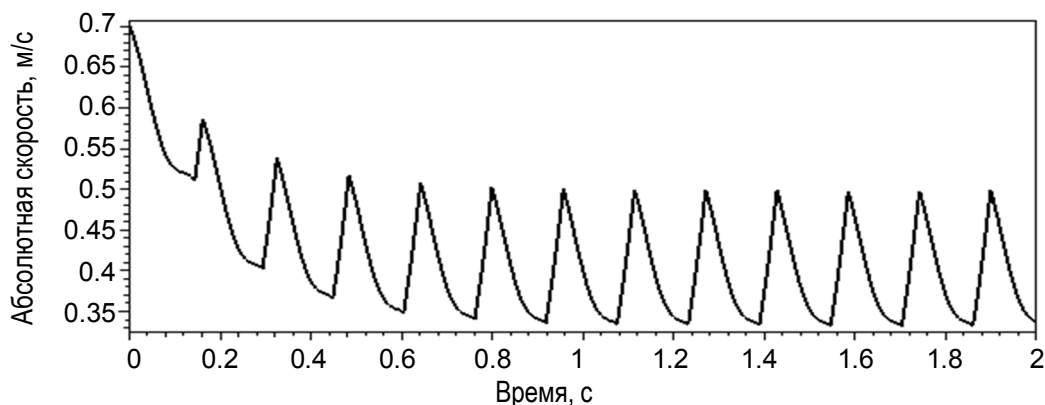


Рис. 4. Зависимость абсолютной скорости движения от времени

На рисунке 5 визуализировано наложение абсолютных скоростей движения решета и элемента зерновой массы. Кривые, представленные на этом рисунке, показывают, что на участках, где скорость решета больше скорости элемента зернового вороха, и направление силы трения совпадает с направлением движения, скорость частиц растет, в противном случае – уменьшается. Характерен тот факт, что промежутки времени возрастания скорости больше, чем промежутки ее убывания.

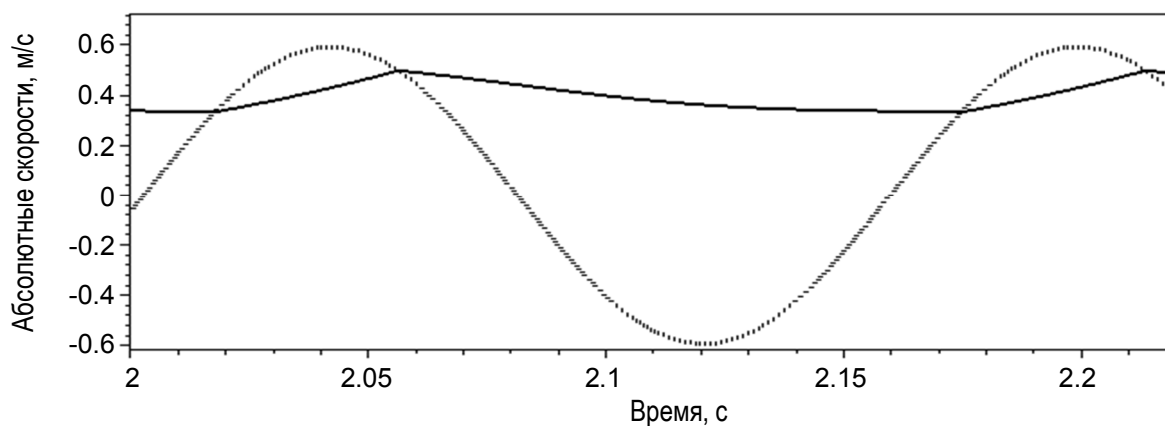


Рис. 5. Абсолютные скорости движения:
 — элемент массы;
 – решето

Для того чтобы сопоставить порядок скачков скорости элемента массы с его положением на решете, смоделируем закон его относительного движения.

В формуле (3) представим абсолютную скорость движения элемента массы как сумму относительной и переносной скоростей $v_{отн} + v_{пер}$

$$\frac{d(v_{отн} + v_{пер})}{dt} = g \sin \alpha \mp f(g \cos \alpha + r\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha) + \mu(v_{отн} + v_{пер})^2. \quad (5)$$

Значение проекции переносной скорости на направление движения определяется по формуле $v_{пер} = r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha$, что позволяет представить формулу (5) в виде

$$\frac{d(v_{отн} + r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha)}{dt} = g \sin \alpha \mp f(g \cos \alpha + r\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha) + \mu(v_{отн} + r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha)^2,$$

или

$$\frac{dv_{отн}}{dt} = r\omega^2 \sin \omega t \cdot \cos \alpha + g \sin \alpha \mp f(g \cos \alpha + r\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha) + \mu(v_{отн} + r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha)^2. \quad (6)$$

Пусть x – относительная координата элемента зернового вороха. Конечно-разностные аналоги относительной скорости и относительного ускорения представляются в виде:

$$v(t_i) \approx \frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{h}; \quad \frac{dv}{dt} \approx \frac{x(t_{i+2}) - 2x(t_{i+1}) + x(t_i))}{h^2}.$$

Подставив последние выражения в формулу (6), получим

$$\frac{x(t_{i+2}) - 2x(t_{i+1}) + x(t_i))}{h^2} = r\omega^2 \sin \omega t \cdot \cos \alpha + g \sin \alpha \mp f(g \cos \alpha + r\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha) + \mu \left(\frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{h} + r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha \right)^2,$$

или

$$x(t_{i+2}) = 2x(t_{i+1}) - x(t_i) + h^2 \left[\begin{array}{l} r\omega^2 \sin \omega t_i \cdot \cos \alpha + g \sin \alpha \mp \\ \mp f(g \cos \alpha + r\omega^2 \sin \omega t_i \cdot \sin \alpha) + \\ + \mu \left(\frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{h} + r\omega \cos \omega t_i \cdot \cos \alpha \right)^2 \end{array} \right]. \quad (7)$$

Начальные условия для данной задачи Коши будут иметь вид: $x(t_0) = 0$ и $x(t_1) = x(t_0) + v_0 h$.

Так же, как и ранее, вводится условный оператор, проверяющий знак относительной скорости движения, и строится циклический процесс, который последовательно в каждой точке временного шага определяет относительную координату и относительную скорость движения элемента зерновой массы.

На рисунке 6 представлены графики зависимостей относительной скорости и относительной координаты движения элемента зерновой массы от времени при $v(0) = 0,4$. Кривые, изображенные на этих графиках, показывают, что элемент массы достигает конца решета длиной 1,15 м через промежуток времени 3 с.

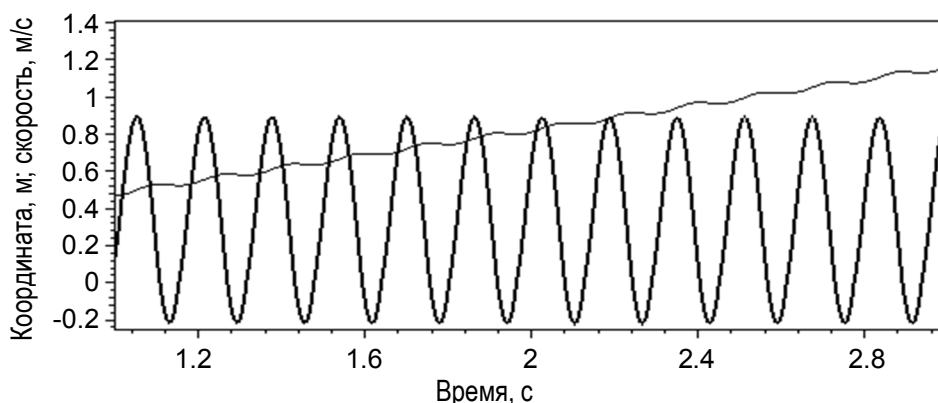


Рис. 6. Относительная скорость – тонкая линия; относительная координата – толстая линия

Таким образом, в результате проведенных исследований получены математические модели абсолютного и относительного движений элемента зернового вороха по сепарационному решету, позволяющие учесть действующие силы на элемент зерновой массы, определить скорость движения и время сепарации.

Библиографический список

1. Галкин А.Д. Методы и средства повышения эффективности послеуборочной обработки зерна и семян (для хозяйств Среднеуральского региона) / А.Д. Галкин, В.Д. Галкин, А.М. Гузаиров // Совершенствование конструкций с.-х. техники в растениеводстве. – Пермь, 2001. – 84 с.
2. Галкин В.Д. Параметры и режимы решетного функционирования семян зерновых культур с легконатурной примесью / В.Д. Галкин // Совершенствование конструкций с.-х. техники в растениеводстве. – Пермь : Изд-во Пермского с.-х. института, 1990. – С. 40–53.
3. Гиевский А.М. Исследование работы диаметрального вентилятора в пневмосистемах машин серии ОЗФ / А.М. Гиевский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 6. – С. 35–36.
4. Гиевский А.М. Качественные показатели работы двухаспирационной пневмосистемы зерноочистительной машины с одним воздушным потоком / А.М. Гиевский, А.В. Чернышов, И.В. Баскаков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – № 9. – С. 15–17.
5. Гиевский А.М. Обоснование параметров двухаспирационной пневмосистемы с последовательным обслуживанием одним воздушным потоком / А.М. Гиевский // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1 (36). – С. 90–97.
6. Гиевский А.М. Обоснование параметров наклонного пневмосепарирующего канала первой аспирации машин серии ОЗФ / А.М. Гиевский, А.И. Королев // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 3. – ГОУ ВПО ВГЛТА. – 2008. – С. 91–98.
7. Гиевский А.М. Пневмосистема зерноочистительной машины с одним воздушным потоком / А.М. Гиевский // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 4. – С. 2–4.
8. Гиевский А.М. Повышение эффективности работы двухаспирационной пневмосистемы универсальной воздушно-решетной зерноочистительной машины / А.М. Гиевский и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 5. – С. 32–34.
9. Гиевский А.М. Повышение эффективности работы канала послерешетной очистки / А.М. Гиевский, А.А. Никульников // Инновационные технологии и технические средства для АПК : матер. международной науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – Ч. III. – С. 272–279.
10. Гиевский А.М. Снижение энергозатрат на работу двухаспирационной пневмосистемы / А.М. Гиевский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2016. – № 1. – С. 2–4.
11. Гиевский А.М. Совершенствование пневмосепарирования зерна машинами серии ОЗФ / А.М. Гиевский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 10. – С. 5.

12. Ермольев Ю.И. Фракционные технологии семенной очистки зерна / Ю.И. Ермольев, М.Н. Московский, М.В. Шемсунов // Тракторы и с.-х. машины. – 2005. – № 6. – С. 23–25.
13. Зюлин А.Н. Теоретические проблемы развития технологий сепарирования зерна : монография / А.Н. Зюлин. – Москва : ВИМ, 1992. – 208 с.
14. Косилов Н.И. Модернизация поточных линий / Н.И. Косилов, С.В. Фомин, Д.Н. Косилов // Сельский механизатор. – 2005. – № 1. – С. 14–15.
15. Лебедев В.Б. Обработка и хранение семян / В.Б. Лебедев. – Москва : Колос, 1983. – 203 с.
16. Лебедев В.Б. Промышленная обработка и хранение семян / В.Б. Лебедев. – Москва : Агропромиздат, 1991. – 225 с.
17. Оробинский В.И. Совершенствование технологии послеуборочной обработки семян фракционированием и технических средств для ее реализации : дис. ... д-ра с.-х. наук : 05.20.01 / В.И. Оробинский. – Воронеж, 2007. – 334 с.
18. Тарабрин Д.С. Совершенствование процесса пневмосепарации зернового вороха на двухаспирационных зерноочистительных машинах : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Д.С. Тарабрин. – Воронеж, 2018. – 159 с.
19. Тарасенко А.П. Обоснование схемы расстановки решет в решетном стане / А.П. Тарасенко и др. // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. – № 5. – С. 9–11.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Владимир Иванович 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», Россия, г. Воронеж, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Владимир Павлович Шацкий – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой математики и физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: mathem@agroeng.vsau.ru.

Людмила Ивановна Федулова – кандидат технических наук, доцент кафедры математики и физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: mathem@agroeng.vsau.ru.

Ирина Владимировна Гриднева – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: mathem@agroeng.vsau.ru.

Ким Рубенович Казаров – 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: smachin@agroeng.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 26.10.2018

Дата принятия к печати 20.11.2018

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vladimir 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, Russia, Voronezh, e-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Vladimir P. Shatsky – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: mathem@agroeng.vsau.ru.

Ludmila I. Fedulova – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: mathem@agroeng.vsau.ru.

Irina V. Gridneva – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, the Dept. of Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: mathem@agroeng.vsau.ru.

Kim R. Kazarov – 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: smachin@agroeng.vsau.ru.

Received October 26, 2018

Accepted November 20, 2018