

DOI 10.12737/2073-0462-2021-84-89  
УДК 631.362.3.001.4:63.001.

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ДЛЯ  
ВОЗДУШНОЙ ОЧИСТКИ СЕМЯН ТРАВ И ЗЕРНА**  
П.А. Савиных, Ю.В. Сычугов, В.А. Казаков, Б.Г. Зиганшин

**Реферат.** Для решения проблемы окончательной очистки зернового материала от примесей разработан пневмосепаратор СП-2У-Р, позволяющий выделять воздушным потоком из зерна соломистые примеси, семена сорных растений, пыль. Для обеспыливания отработавшего воздуха на пневмосепаратор установлен ротационный поперечно-поточный пылеуловитель с активным рабочим органом – ротором. Конструктивно-технологическая и расчётная схемы ротационного пылеуловителя позволили разработать математическую модель движения частиц примесей по лопаткам ротора в зависимости от величин следующих параметров:  $D_n$  – наружный диаметр,  $l$  – длина лопатки,  $Z$  – количество лопаток,  $n$  – частота вращения ротора,  $\varphi_o$  – угол начала взаимодействия частиц примесей с лопаткой,  $f$  – коэффициент трения частиц о лопатки,  $V$  – скорость о пылевоздушного потока. Использование построенной математической модели открывает возможности для оценки эффективности пылеулавливания на ранних этапах исследований. Определены условия выделения примесей из отработавшего пылевоздушного потока и последующей их утилизацией: частица примесей с текущими полярными координатами  $r$  и  $\varphi$ , взаимодействующая с лопаткой ротора и движущаяся по ней, считается выделенной из пылевоздушного потока, если расстояние от центра вращения ротора будет  $r^3R$ , достигается в угловом секторе  $\varphi = \varphi_{\text{вых}} \leq \varphi_{\text{max}}$ , где  $\varphi_{\text{вых}} = \varphi_o + \omega \cdot t_{\text{вых}}$  и наибольшее расстояние  $S_{\text{max}}$ , пройденное частицей к центру ротора, не превышает длины лопатки ротора:  $S_{\text{max}} \leq l$ . Результаты исследований позволяют провести оценку технологического процесса устройства: все частицы примесей, движущиеся вместе с воздухом и со скоростью  $V = 10$  м/с набегающие на вращающийся с частотой  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> ротор с конструктивными параметрами  $D_n = 0,3$  м,  $l = 0,06$  м,  $Z = 28$ ,  $a = 0^0$ , выделяются из воздушного потока и отправляются на утилизацию. Полученные данные использованы при разработке конструкторской документации пылеулавливающего устройства.

**Ключевые слова:** зерно, очистка, примеси, пыль, ротор, фильтр, движение, семена трав.

**Введение.** От качества семенного материала сельскохозяйственных культур напрямую зависит их урожайность. Например, если посев проведён семенами, в которых доля не удалённых фракций (травмированное, дроблённое, щуплое, невсхожее зерно, минеральные примеси (пыль), семена сорных растений) достигает 10...15 %, наблюдается снижение урожайности. И, наоборот, посев высококлассными (чистота более 99 %), обладающими высокой всхожестью семенами добавляет к урожаю 3...4 ц/га (15...20 %) [1, 2, 3]. Для обеспечения необходимой чистоты и всхожести семян сельскохозяйственных культур разработаны технологии послеуборочной обработки на стационарных пунктах и комплексах, которые включают предварительную очистку зернового и травяного вороха после обмолота комбайнами, сушку (при необходимости), первичную и вторичную (в основном для производства семенного материала) очистку. При правильном подборе технических средств, осуществляющих эти технологии, и настроек их рабочего процесса, на выходе получают очищенный семенной материал, удовлетворяющий агротехническим требованиям по чистоте и всхожести. Однако зачастую возникает следующая проблема: при прохождении семян по рабочим органам очистительных машин они травмируются, дробятся, истираются. Возникает потребность в окончательном удалении образующихся в процессе очистки некондиционных зерновых и пылевидных фракций для доведения семян до посевных стандартов.

Результаты анализа уровня техники для

послеуборочной обработки зерна и семян трав свидетельствуют, что для окончательной очистки необходимо использовать машины, разделяющие зерновой материал на фракции воздушным потоком [4, 5, 6,]. Они практически не травмируют зерно и семена трав, обладают несложным устройством и простыми настройками рабочего режима, при этом эффект очистки семенного материала составляет 50 % и более [7, 8, 9].

Цель исследований – разработка конструктивно-технологической схемы пневмосепаратора для воздушной очистки от примесей зерна и семян трав и теоретическое обоснование рабочего процесса его ротационного пылеуловителя.

**Условия, материалы и методы исследований.** Работу проводили в г. Кирове в период с 2010 по 2020 гг. на научно-производственной базе Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» и Проектно-конструкторского бюро Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северо-Востока.

Для воздушной очистки семян трав и зерна от лёгких примесей и пыли разработан пневмосепаратор (очиститель пневматический) ОПС-2ДР (рис. 1) с новым исполнением пылеуловителя [10, 11], новизна конструкции и технологического процесса которого подтверждена патентом RU №2165313 «Пневматический сепаратор». Технологический процесс представляемой зерно-семяочистительной машины заключается в

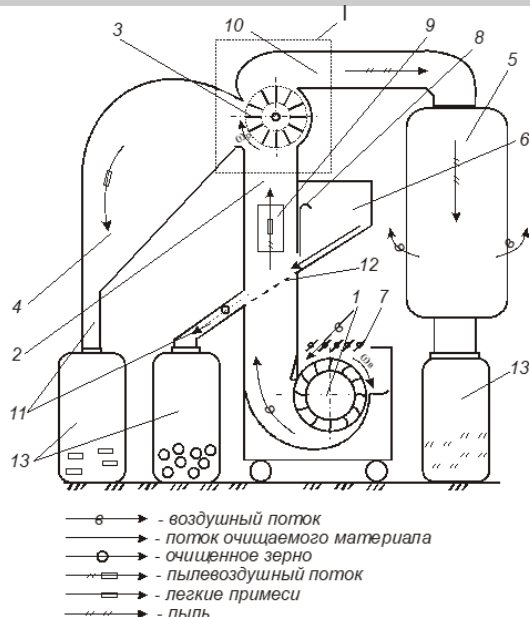


Рис. 1 – Конструктивно-технологическая схема (а) и общий вид пневмосепаратора ОПС-2ДР для очистки от примесей семян трав и зерна (б): 1 – ротационный поперечно-поточный пылеуловитель, 1 – вентилятор, 2 – пневмосепарирующий канал, 3 – ротационный пылеуловитель, 4 – пылеосадительная камера, 5 – тканевый фильтр, 6 – приёмное устройство, 7 – дроссель, 8 – задвижка, 9 – смотровое окно, 10 – воздуховод, 11 – материалопроводы, 12 – сменная сетка, 13 – мешки

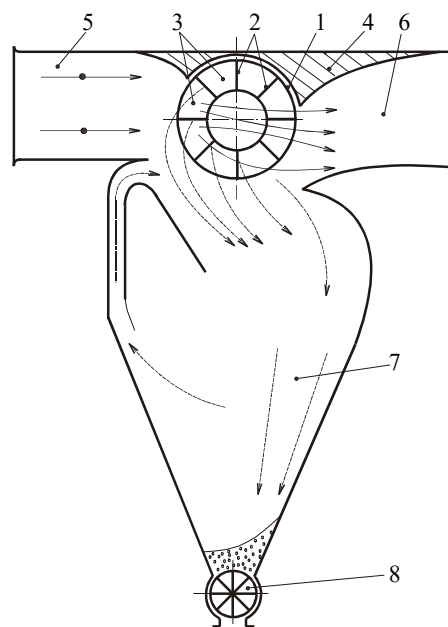
следующем. Очищаемый материал (семена трав или зерновых культур) загруженный в бункер 6, при открытии заслонки 8 самотеком поступает в пневмосепарирующий канал 2, снабженный наклонно установленной сеткой 12, где воздушным потоком легкие примеси, пыль, щуплые и поврежденные семена основной культуры выносятся вверх и попадают в пылеуловитель 3, а очищенное воздушным потоком полноценное зерно по сетке 12 и далее по материалопроводу 11 поступает в мешки 13, которые по мере заполнения отправляются на хранение.

В пылеуловителе 3 примеси попадают на лопасти вращающегося ротора. Наиболее крупные из них центробежной силой направляются в осадочную камеру 7, а воздух с легкими примесями проходит по межлопаточным каналам в поперечном направлении и по воздуховоду 9 поступает в тканевый фильтр 10, при прохождении через который окончательно очищается.

Ротационный пылеуловитель с центробежным движением воздуха для пневмосепаратора имеет основной рабочий орган – ротор, и совмещает пылеуловитель и вентилятор, имеющий плоскопараллельный воздушный поток (рис. 2). Запыленный воздух, удаляемый, например, из пневмосепарирующего канала, нагнетается во входной патрубок 5 пылеуловителя, откуда поступает в каналы 3 ротора 1 и перемещается по ним от периферии к центру.

При вращении ротора 1 его лопатки 2 соприкасаются с частицами пыли, находящимися в воздухе. При этом на частицы пыли действуют аэродинамическая сила, направленная

по траектории движения потока воздуха, то есть от периферии к центру, и центробежная сила, направленная от центра к периферии. При превышении центробежной силы над аэродинамической, частицы пыли отбрасываются за пределы ротора 1 и поступают в пыле-



—●— -запыленный воздух; —●— -пыль; — -очищенный воздух

Рис. 2 – Схема ротационного поперечно-поточного пылеуловителя: 1 – ротор; 2 – лопатки ротора; 3 – межлопаточные каналы; 4 – корпус пылеуловителя; 5, 6 – входной и выходной патрубки; 7 – пылеосадительная камера; 8 – устройство вывода уловленной пыли; 9 – рециркуляционный канал

осадительную камеру 7, откуда устройством 8 выводятся наружу. Очищенный воздух из центральной части ротора продолжает движение в поперечном направлении и снова перемещается по каналам 3, но уже от центра к периферии – в сторону выходного патрубка 6 и частично в пылеосадительную камеру 7. Помимо очистки воздуха от пыли вращающийся ротор 1 в сочетании с корпусом 4, входным и выходным патрубками 5 и 6 работает как диаметральный вентилятор, то есть создает избыточное давление и равномерный поток воздуха по всей ширине ротора.

**Анализ и обсуждение результатов.** Процесс выделения частиц пыли и примесей из пылевоздушного потока в ротационном поперечно-поточном пылеуловителе происходит следующим образом (рис. 3).

Пылевоздушный поток со скоростью  $V$  набегает на лопатки ротора, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ , имеющего  $z_l$  лопаток длиной  $l$ , установленных под углом  $\alpha$  к радиус-вектору. Частицы пыли, пройдя в межлопаточном пространстве вместе с пылевоздушным потоком некоторое расстояние ( $DA$ ), попадают на лопатку ротора в точке  $A$ , расположенной на расстоянии  $S$  от наружного диаметра ротора. Положение лопатки при этом определяется полярным углом  $\varphi_0$  между радиус-вектором ротора, перпендикулярным вектору  $\bar{V}$  скорости пылевоздушного потока, и радиус-вектором, проходящим через точку  $A$ . Взаимодействуя с поверхностью лопаток, частицы сначала движутся к центру ротора, так как аэродинамическая сила и сила инерции превышают центробежную силу, возникаю-

щую в результате придания частицам вращательного движения. Кроме того, при сложении вращательного и поступательного движения частиц возникает сила Кориолиса, прижимающая частицы к лопатке и создающая силу трения, направленную в противоположную сторону. Таким образом, частица затормаживается, затем наступает момент, когда центробежная сила превышает все остальные, и частицы под ее воздействием начинают двигаться по лопаткам ротора к его периферии и выводятся наружу в точке  $B$  с полярными координатами:

$$r = \frac{D_n}{2} = R \quad \phi_{\text{вых}} = \phi_0 + \omega \cdot t_{\text{вых}}$$

Воздух же проходит по межлопаточным каналам от периферии ротора к центру и далее, от центра к периферии, а затем в нагнетательный патрубок (на рис. 3 условно изображен пунктирными линиями).

Частица примесей с текущими полярными координатами  $r$  и  $\varphi_{\text{max}}$ , взаимодействующая с лопаткой ротора идвигающаяся по ней, считается выделенной из пылевоздушного потока, если расстояние от центра вращения ротора до частицы будет  $r^3R$ , достигается в угловом секторе  $\varphi = \varphi_{\text{вых}} \leq \varphi_{\text{max}}$  (где  $\varphi_{\text{вых}} = \varphi_0 + \omega \cdot t_{\text{вых}}$ , а  $\varphi_{\text{max}} = 140 \dots 190^\circ$  – угол входа воздушного потока в колесо диаметрального вентилятора) и наибольшее расстояние  $S_{\text{max}}$ , пройденное частицей к центру ротора, не превышает длины лопатки ротора  $l$ :  $S_{\text{max}} \leq l$ .

$$m\bar{W} = \bar{P}_a + \bar{P}_y + \bar{P}_k + \bar{P}_g + \bar{P}_{mp} \quad (1)$$

где  $\bar{P}_a = k_n \cdot m \cdot \bar{V}^2$  – сила аэродинамического

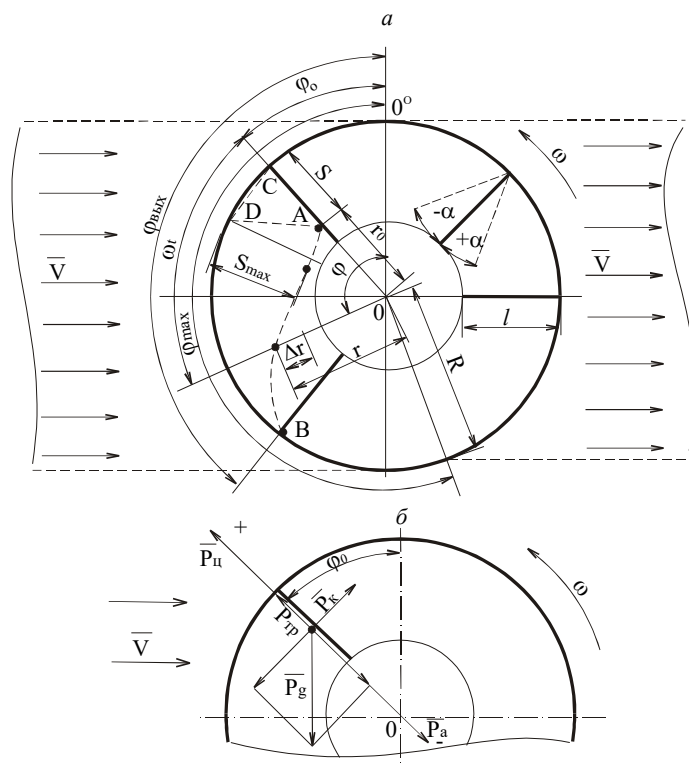


Рис. 3 – Взаимодействия частицы примесей с поверхностью лопадки ротора

сопротивления:

$k_n$  – коэффициент парусности частицы примесей,  $\text{м}^{-1}$ ;

$m$  – масса частицы, кг;

$V$  – скорость пылевоздушного потока, м/с;

$$\bar{P}_u = m \cdot \omega^2 \cdot \bar{r} - \text{центробежная сила,}$$

где  $\omega$  – частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$r$  – расстояние от центра вращения до частицы, м;

$$\bar{P}_\kappa = 2m \cdot \omega \cdot \bar{V}_r = 2m \cdot \omega \cdot \dot{r}$$

$$\bar{P}_u = m \cdot \omega^2 \cdot \bar{r} - \text{кориолисова сила,}$$

где  $V_r$  – относительная скорость движения частицы по лопатке, м/с;

$\bar{P}_u = m \cdot \omega^2 \cdot \bar{r}$  – первая производная расстояния от центра вращения ротора до исследуемой частицы, м;

$$\bar{P}_u = m \cdot \omega^2 \cdot \bar{r} = V_r;$$

$$\bar{P}_{mp} = f \cdot \bar{N} = f \cdot (\bar{P}_\kappa + \bar{P}_g + \bar{P}_a + \bar{P}_u) -$$

сила трения частицы о лопатку;

$N$  – сила, прижимающая частицу примесей к лопатке ротора, равная сумме составляющих кориолисовой  $P_\kappa$  и аэродинамической  $P_a$  силы, силы тяжести  $P_g$  и центробежной силы  $P_u$  на плоскость, перпендикулярную плоскости лопатки;

$$\bar{P}_g = m \cdot \bar{g} - \text{сила тяжести, действующая на частицу примесей,}$$

где  $\bar{g}$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\bar{W}$  – абсолютное ускорение частицы примесей, которое является второй производной от расстояния от центра вращения ротора до частицы ( $r$ ).

Решение (1), с учётом принятых ограничений и начальных условий ( $t=0, \phi_o = \frac{\pi}{2}$ ), после необходимых преобразований запишется в виде:

$$r = c_1 \cdot e^{k_1 t} + c_2 \cdot e^{k_2 t} + \frac{g}{2\omega^2} \left( 1 - \frac{2 \cdot f^2}{(1+f^2)} \right) \cos(\omega \cdot t^2 + \phi_o) + \frac{f \cdot g}{\omega^2 \cdot (1+f^2)} \sin(\omega \cdot t + \phi_o) + \frac{K_n \cdot V^2}{\omega^2}, \quad (2)$$

$$\text{где } k_{1,2} = \omega \cdot (f \pm \sqrt{f^2 + 1}), \quad (3)$$

$$c_1 = R - S - c_2 - \frac{f \cdot g}{\omega^2 \cdot (1+f^2)} - \frac{k_n \cdot V^2}{\omega^2}, \quad (4)$$

$$c_2 = \left( R - S - \frac{k_n \cdot V^2}{\omega^2} - \frac{f \cdot g}{\omega^2(1+f^2)} \right) \cdot \frac{k_1}{k_1 - k_2} + \left[ V - \frac{g}{2 \cdot \omega} \left( 1 - \frac{2 \cdot f^2}{1+f^2} \right) \right] \cdot \frac{1}{k_1 - k_2}. \quad (5)$$

$$S = V \cdot \frac{2\pi}{\omega \cdot z_n} \cdot \sin \phi_o \quad (6)$$

Выражение (2) с учётом выражений (3, 4, 5, 6) определяет положение частицы примесей на лопатке ротора, имеющей угол наклона к радиус-вектору  $a=0$  в полярных координатах в момент времени  $t$ . Численно определяя величину  $r$  с шагом  $Dt$ , получаем некоторое мно-

жество точек, соединив которые, имеем траекторию движения частицы примесей по лопатке ротора. Следовательно, (2) это математическая модель траектории движения частиц примесей по лопаткам ротора. Для получения математической модели в общем виде (когда  $a \neq 0$ ) необходимо решать (2) с учётом:

$$\begin{cases} \dot{r} = \omega^2 \cdot R \cdot \sqrt{(1 - S/R)^2 - \sin^2 \alpha} - k_n \cdot (V + \dot{r})^2 - \\ - g \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_o) - f \cdot (2\omega \cdot r - g \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_o)); \\ S = \frac{2 \cdot V}{\omega} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( \frac{S \cdot \text{tg} \alpha}{2 \cdot (r - S)} \right) \right) \cdot \sin \alpha. \end{cases}$$

При решении (2) принимаем, что скорости движения воздушного потока  $V_g$  и  $V_u$  примесей до попадания частицы примеси на лопатку ротора равны по величине, одинаковы по направлению и равны  $V$ ; в межлопаточном пространстве скорость воздушного потока постоянная, направлена вдоль лопаток и равна скорости  $V$  потока на входе в пылеуловитель; частицы, попадая на лопатки ротора, не прилипают и не отскакивают от них.

В качестве примера расчета траектории рассмотрим движение частицы примеси со скоростью витания  $V_{kp}=3,1$  м/с, коэффициентом трения частицы о лопатку ротора  $f=0,4$  и коэффициентом парусности  $k_n=1$   $\text{м}^{-1}$  ( $V_{kp}$  и  $k_n$  взаимосвязаны:

$$V_{kp} = \sqrt{\frac{g}{k_n}},$$

где  $k_n = \frac{k \cdot \rho \cdot F}{m}$  и зависит от  $m$  – массы ча-

стицы,  $k$  – коэффициента аэродинамического сопротивления,  $\rho$  – плотности воздуха,  $F$  – миделева сечения частицы). Частица примеси движется в потоке воздуха со скоростью  $V=10$  м/с и вместе с ним набегаёт на вращающийся с частотой  $n=1500$   $\text{мин}^{-1}$  ротор, с наружным диаметром  $D_n$ , длиной лопатки  $l=0,06$  м, количеством лопаток  $z=28$ , расположенных под углом  $a = 0$  к радиус-вектору, в точке  $A$  (рис. 3) с полярными координатами

$$\phi_o = \frac{\pi}{2} \text{ и } r = \frac{D_n}{2}.$$

Пройдя в межлопаточном пространстве расстояние  $S=0,01$  м. (6), частица встречается с лопаткой в точке  $B$ . Сначала она движется вдоль лопатки от периферии к центру. Затем, когда противодействующие силы выравниваются, частица останавливается в некоторой точке  $C$ , и начинается ее движение от центра к периферии ротора. Преодолевая сопротивление воздуха и силу трения, центробежная сила выводит частицу примеси наружу в точку  $F$  с

$$\text{полярными координатами } r = \frac{D}{2}, \phi_{\text{вых}}=175^\circ.$$

Зная физические характеристики примесей и конструктивно-технологические параметры пылеуловителя, можно определить условия

выхода примесей из пылевоздушного потока. Возможно также решение других задач, например, определение (по размерам) выделения пылеуловителем примесей по известным физическим характеристикам; технологических параметров пылеуловителя при известных конструктивных параметрах пылеуловителя и физических свойствах примесей; основных конструктивных параметров пылеуловителя при известных технологических параметрах (например, известна его производительность  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, запыленность на входе в пылеуловитель, требуемая запыленность на выходе из пылеуловителя) и физико-механических свойствах примесей.

**Выводы.** Теоретически исследован процесс движения частиц примесей в роторе пылеуловителя пневмосепаратора СП-2У-Р. Определены условия выделения примесей из пылевоздушного потока: частица примесей с текущими полярными координатами  $r$  и  $\varphi$ , взаимодействующая с лопаткой ротора и дви-

жущая по ней, считается выделенной из пылевоздушного потока, если расстояние от центра вращения ротора будет  $r^3R$ , достигается в угловом секторе  $\varphi = \varphi_{\text{вых}} \leq \varphi_{\text{max}}$ , где  $\varphi_{\text{вых}} = \varphi_0 + \omega \cdot t_{\text{вых}}$ , и наибольшее расстояние  $S_{\text{max}}$ , пройденное частицей к центру ротора, не превышает длины лопатки ротора:  $S_{\text{max}} \leq l$ . Разработана математическая модель траектории движения частиц примесей относительно лопаток ротора пылеуловителя в зависимости от его конструктивных и технологических параметров: наружного диаметра ( $D_n$ ), длины лопатки ( $l$ ), количества лопаток ротора ( $Z$ ), угла начала взаимодействия частиц примесей с лопаткой ( $\varphi_0$ ), коэффициента трения частиц о лопатку ( $f$ ), коэффициента парусности частиц примесей ( $k_n$ ), скорости очищаемого пылевоздушного потока ( $V$ ), частоты вращения ротора ( $n$ ), позволяющая на ранних этапах исследований оценить эффективность пылеулавливания.

#### Литература

1. Промышленное семеноводство: справочник / В. И. Анискин, А. И. Батарчук, Б. А. Весна и др.; под ред. И. Г. Строны. М.: Колос, 1980. 287 с.
2. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.
3. Зимин Е. М. Комплексы для очистки, сушки и хранения семян в Нечерноземной зоне. М.: Россельхозиздат, 1978. 159 с.
4. Кожуховский И. Е. Зерноочистительные машины: Конструкции, расчет и проектирование. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.
5. Савиных П. А., Сычугов Ю. В., Казаков В. А. Новые технологии и технические средства при реконструкции зерноочистительно-сушильных комплексов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2010. № 3. С. 65–68.
6. Technology and equipment for obtaining starch syrup with ground and whole cereal grain / P. Savinykh, V. Kazakov, N. Czerniatiev, et al. // Agricultural engineering. 2018. Vol. 22. No. 3 (167). P. 57–67. doi: 10.1515/agriceng-2018-0027.
7. Production and Use of Rapeseed Oil in Power Plant Machinery in the Northeast of European Part / A. Marczuk, J. Caban, A. Kartashevich, et al. // Jokull Journal. 2017. No. 67 (8). P. 8–21.
8. Angular oscillation model to predict the performance of a vibratory ball mill for the fine grinding of grain / V. Bulgakov, S. Pascuzzi, S. Ivanovs, et al. // Biosystems Engineering. 2018. Vol. 171. P. 155–164. doi:10.1016/j.biosystemseng.2018.04.021.
9. Нелюбов А.И., Ветров Е.Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1977. 192 с.
10. Пневматический сепаратор / А.И. Бурков, О.П. Рощин, В.А. Казаков и др. // Патент РФ № 2165313, 20.04.2001.
11. Андреев В.Л., Бурков А.И., Казаков В.А. Поперечно-поточный ротационный пылеуловитель / Патент РФ № 2122462, 27.11.1998.

#### Сведения об авторах:

Савиных Петр Алексеевич – доктор технических наук, зав. лабораторией механизации животноводства, e-mail: peter.savinyh@mail.ru  
 Сычугов Юрий Вячеславович – доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механизации животноводства e-mail: yuri.sychugov@mail.ru  
 Казаков Владимир Аркадьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механизации животноводства, e-mail: kazakov.vladimir.263@mail.ru  
 Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, г. Киров, Россия  
 Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор РАН, профессор кафедры машины и оборудование в агробизнесе, e-mail: zigan.66@mail.ru  
 ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань. Россия

#### DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A MACHINE FOR AIR CLEANING OF GRASS AND GRAIN SEEDS P.A. Savinykh, Yu.V. Sychugov, V.A. Kazakov, B.G. Ziganshin

**Abstract.** To solve the problem of final cleaning of grain material from impurities, a pneumatic separator SP-2U-R has been developed, which allows the air flow to separate various weeds from the grain – straw impurities, weed seeds, dust, etc. To remove dust from the exhaust air, a rotary cross-flow dust collector is installed on the pneumatic separator. The novelty of the design and working process of the separator and dust collector is confirmed by patents RU No.

2165313 and No. 2122462, respectively. Theoretical studies of the working process of this dust collector are carried out. The conditions for the allocation of impurities from the dust-air flow: particle impurities with current polar coordinates  $r$  and  $j$  interacting with the rotor blade and moving through it, is considered to be isolated from the dust-air flow if the distance from the center of rotation will be  $r^2R$ , and is achieved in the angular sector  $\varphi = \varphi_{\text{обл}} \leq \varphi_{\text{max}}$ , where  $\varphi_{\text{обл}} = \varphi_0 + \omega \cdot t_{\text{обл}}$ , and  $S_{\text{max}}$  the largest distance traveled by a particle to the center of the rotor does not exceed the length of rotor blades:  $S_{\text{max}} \leq l$ . The mathematical model of the trajectory of the particles of impurities relative to the rotor blades of a dust collector depending on its parameters:  $D_n$  - outer diameter,  $l$  - length of the blade,  $z$  - number of rotor blades,  $\varphi_0$  - the angle of the beginning of interaction of the impurity with a shovel,  $f$  - coefficient of friction of the particles on the blades,  $k_n$  - coefficient of sail particles of impurities,  $V$  - speed dusty flow,  $n$  - frequency of rotation of the rotor, – it allows to evaluate the efficiency of dust collection at the early stages of research, as well as to develop design documentation for a device with pre-known operational characteristics.

**Key words:** grain, cleaning, impurities, dust, rotor, filter, movement, grass seeds.

#### References

1. Aniskin VI, Batarchuk AI, Vesna BA, Strony IG. Promyshlennoe semenovodstvo: spravochnik. [Industrial seed production: a reference book]. Moscow: Kolos. 1980; 287 p.
2. Gortinskii VV, Demskii AB, Boriskin MA. Protssesy separirovaniya na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh. [Separation processes at grain processing enterprises]. Moscow: Kolos. 1980; 304 p.
3. Zimin EM. Kompleksy dlya ochistki, sushki i khraneniya semyan v Nechernozemnoi zone. [Complexes for cleaning, drying and storage of seeds in the Non-Chernozem zone]. Moscow: Rossel'khozizdat. 1978; 159 p.
4. Kozhukhovskii IE. Zernoochistitel'nye mashiny: Konstruktsii, raschet i proektirovanie. [Grain cleaning machines: constructions, calculation and design]. Moscow: Mashinostroenie. 1974; 200 p.
5. Savinykh PA., Sychugov YuV., Kazakov VA. New technologies and technical means during the reconstruction of grain cleaning and drying complexes. Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2010; (3): 65-68 p.
6. Savinykh P, Kazakov V, Czerniatiev N. Technology and equipment for obtaining starch syrup with ground and whole cereal grain. Agricultural engineering. 2018; 22 (3), (167): 57-67 p. doi: 10.1515/agriceng-2018-0027.
7. Marczuk A, Caban J, Kartashevich A. Production and use of rapeseed oil in power plant machinery in the Northeast of European Part. Jokull journal. 2017; 67 (8). 8-21 p.
8. Bulgakov V, Pascuzzi S, Ivanovs S. Angular oscillation model to predict the performance of a vibratory ball mill for the fine grinding of grain. Biosystems engineering. 2018; 171. 155-164 p. doi:10.1016/j.biosystemseng.2018.04.021.
9. Nelyubov AI, Vetrov EF. Pnevmostepariruyushchie sistemy sel'skokhozyaistvennykh mashin. [Pneumatic separation systems of agricultural machines]. Moscow: Mashinostroenie. 1977; 192 p.
10. Burkov AI, Roshchin OP, Kazakov VA. Pnevmaticheskii separator. [Pneumatic separator]. Patent RF № 2165313, 20.04.2001.
11. Andreev VL, Burkov AI, Kazakov VA. Poperechno-potochnyi rotatsionnyi pyleulovitel'. [Cross-flow rotary dust collector]. Patent RF № 2122462, 27.11.1998.

#### Authors

Savinykh Petr Alekseevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, chief scientist, head of livestock breeding mechanization laboratory ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5668-8479>, e-mail: [peter.savinyh@mail.ru](mailto:peter.savinyh@mail.ru),  
 Sychugov Yuri Vyacheslavovich – Doctor of Technical Sciences, senior researcher of livestock breeding mechanization laboratory of, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1425-7418>, e-mail: [yuri.sychugov@mail.ru](mailto:yuri.sychugov@mail.ru),  
 Kazakov Vladimir Arkadievich – Ph.D. of Technical Sciences, senior researcher of livestock breeding mechanization laboratory, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3512-317X>, e-mail: [kazakov.vladimir.263@mail.ru](mailto:kazakov.vladimir.263@mail.ru).  
 Federal state budgetary institution “Federal agricultural research centre of North-East named after N. In. Rudnicki”  
 Ziganshin Bulat Gusmanovich – doktor of technical sciences, professor of RAS, professor the chair « Machinery and equipment in agribusiness », e-mail: [zigan.66@mail.ru](mailto:zigan.66@mail.ru)  
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia