

УДК 631.362.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПНЕВМОСИСТЕМ С КОЛЬЦЕВЫМ АСПИРАЦИОННЫМ КАНАЛОМ

<sup>1</sup>Андреев В.Л., <sup>2</sup>Курбанов Р.Ф., <sup>3</sup>Сайтов В.Е., <sup>4</sup>Шилин В.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический институт»,  
Княгинино;

<sup>2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», Киров,  
e-mail: vicsait-valita@e-kirov.ru

В составе зерноочистительно-сушильных комплексов хозяйств применяются виброцентробежные сепараторы МЗП-50(25). Однако пневмосистема данной машины не обеспечивает качественное выделение легких примесей. Для повышения эффективности очистки зерна и семян виброцентробежными сепараторами разработана пневмосистема с вертикальным кольцевым аспирационным каналом с устройством ввода материала в пневмосепарирующий канал в виде вращающегося дискового распределителя. Проведенные теоретические исследования позволили определить рациональные параметры дискового распределителя зерна. На основе полученных результатов разработана виброцентробежная машина первично-вторичной очистки семян МЗП-25/10. Использование разработанной машины в составе технологической линии при первичной очистке обеспечивает получение за один пропуск семян 1 и 2 класса чистоты.

**Ключевые слова:** зерноочистительная машина, пневмосистема, аспирационный канал, зерновой материал, воздушный поток, дисковый распределитель.

## PERFORMANCE OPTIMIZATION OF STRUCTURAL COMPONENTS WITH RING PNEUMATIC ASPIRATION CHANNEL

<sup>1</sup>Andreev V.L., <sup>2</sup>Kurbanov R.F., <sup>3</sup>Saitov V.E., <sup>4</sup>Shilin V.V.

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Engineering-Economic Institute, Knyaginino;

<sup>2,3,4</sup>Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, e-mail: vicsait-valita@ e-kirov.ru

As part of grain cleaning and drying systems used farm vibratory centrifugal separators MW-50 (25). However, the pneumatic system of the machine does not provide high-quality selection of light impurities. To improve cleaning efficiency, grain and seed vibrocentrifugal separators designed pneumatic system with a vertical annular suction channel with an input material in pneumoseparating channel in the form of a rotating disc distributor. The theoretical research allowed to determine rational parameters of grain storage distributor. Based on these results the machine vibrocentrifugal primary secondary treatment seed MW-25/10. Using a machine developed as part of the process line at the primary treatment provides for one pass seeds 1 and 2 class purity.

**Keywords:** grain cleaning machine, pneumatic system, suction channel, the grain material, air flow, valve disc

В составе зерноочистительно-сушильных комплексов хозяйств Северо-Востока европейской части России применяются виброцентробежные сепараторы Р8-БЦС-50(25), МЗП-50(25), удельная производительность цилиндрических решет которых в 2–5 раз выше по сравнению с широко используемыми плоскими решетками [8].

Однако данные серийные машины оборудованы пневмосистемами, кольцевой аспирационный канал в которых образован дисковым питателем и корпусом. Зерновой материал в аспирационном канале обрабатывается с повышенной скоростью воздушного потока, но непродолжительное время, так как имеет небольшую длину, в результате чего не все легкие примеси успевают выделяться из очищаемого материала [1].

Исследованиями центробежных сепараторов, преимущественно решетчатой частью, занимались в Московском государственном университете пищевых производств [3, 7, 12]. Помимо решетчатой части, изучалось

перемещение частицы вдоль лопаток распределительного диска.

Между тем, для определения оптимальных параметров пневмосистемы с кольцевым аспирационным каналом представляет закономерный интерес характер перемещения частицы после схода с распределителя.

Для повышения эффективности очистки зерна и семян виброцентробежными сепараторами разработана пневмосистема с вертикальным кольцевым аспирационным каналом, устройство ввода материала в пневмосепарирующий канал которой выполнено в виде вращающегося дискового распределителя [5].

### Результаты исследований и их обсуждение

Частица после схода с дискового распределителя поступает в вертикальный кольцевой аспирационный канал, где на нее действует сила  $\bar{P}_g$  тяжести и сила  $\bar{R}_b$  сопротивления воздуха (рис. 1).

Сила  $\bar{P}_g$  тяжести действует вертикально вниз, а сила  $\bar{R}_B$  сопротивления воздуха направлена противоположно относительной скорости  $\bar{V}_r$  движения частицы, пропорциональна ее квадрату и определяется по формуле [4, 9]

$$\bar{R}_B = -m \cdot k_n \cdot V_r^2 \cdot \frac{\bar{V}_r}{V_r}, \quad (1)$$

где  $\bar{V}_r = \bar{V} - \bar{V}_B$  – вектор относительной скорости;  $V_r$  – ее модуль;  $\bar{V}$  – скорость частицы;  $\bar{V}_B$  – скорость воздушного потока;  $m$  – масса частицы;  $k_n$  – коэффициент парусности.

Дифференциальное уравнение движения частицы в векторной форме запишется в виде

$$m\bar{W} = \bar{P}_g + \bar{R}_B. \quad (2)$$

В проекциях на декартовы оси координат  $\bar{O}x$ ,  $\bar{O}y$  и  $\bar{O}z$  получим:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = R_{Bx}; \\ m \cdot \ddot{y} = R_{By}; \\ m \cdot \ddot{z} = R_{Bz} - \bar{P}_g. \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая выражение (1) для силы  $\bar{R}_B$ , запишем ее проекции на оси координат:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -k_i \cdot \dot{x} \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (\dot{z} - V_B)^2}; \\ \ddot{y} = -k_i \cdot \dot{y} \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (\dot{z} - V_B)^2}; \\ \ddot{z} = -g - k_i \cdot (\dot{z} - V_B)^2 \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (\dot{z} - V_B)^2}. \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} R_{Bx} = -m \cdot k_n \cdot V_r^2 \cdot \frac{V_{rx}}{V_r} = -m \cdot k_n \cdot V_r \cdot V_{rx}; \\ R_{By} = -m \cdot k_n \cdot V_r^2 \cdot \frac{V_{ry}}{V_r} = -m \cdot k_n \cdot V_r \cdot V_{ry}; \\ R_{Bz} = -m \cdot k_n \cdot V_r^2 \cdot \frac{V_{rz}}{V_r} = -m \cdot k_n \cdot V_r \cdot V_{rz}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $V_{rx}$ ,  $V_{ry}$ ,  $V_{rz}$  – проекции относительной скорости на оси координат  $\bar{O}x$ ,  $\bar{O}y$  и  $\bar{O}z$ , определяемые выражениями

$$\begin{cases} V_{rx} = V_x - V_{Bx}; \\ V_{ry} = V_y - V_{By}; \\ V_{rz} = V_z - V_{Bz}. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда модуль относительной скорости можно вычислить по формуле

$$V_r = \sqrt{(V_x - V_{Bx})^2 + (V_y - V_{By})^2 + (V_z - V_{Bz})^2}. \quad (6)$$

Принимая допущение, что поток воздуха от вращения дискового распределителя не оказывает влияния на поток воздуха, создаваемый вентилятором пневмосистемы, имеем

$$V_{rx} = V_x; \quad V_{ry} = V_y; \quad V_{rz} = V_z - V_B \quad (7)$$

Тогда уравнения (3) принимают вид

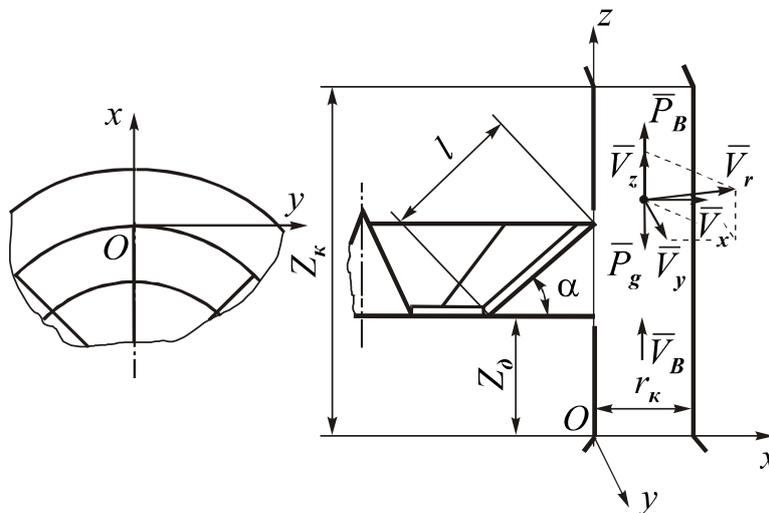


Рис. 1. Схема движения частицы в вертикальном кольцевом аспирационном канале

Систему уравнений (8) решаем методом Рунге-Кутты [9] с помощью программы, написанной на языке *Visual Fortran 5.0*.

За нулевую точку отсчета декартовых осей координат принимаем: по осям  $\bar{O}x$  и  $\bar{O}y$  – начало схода частицы с дискового распределителя, по оси  $\bar{O}z$  – точку выхода частицы тяжелой фракции из вертикального кольцевого аспирационного канала.

При расчете траекторий движения частиц с отличающимися аэродинамическими свойствами при различных значениях скоростей  $V_B$  воздуха в канале, изменяемых частоте  $n_p$  вращения, длине  $l$  и угле  $\alpha$  накло-

на секторов дискового распределителя считаем, что частица покидает зону сепарации при  $z \leq 0$  и  $z \geq Z_k$  ( $Z_k = 0,55$  м) или при достижении частицы наружной стенки канала ( $r_k = 0,1$  м).

Расстояние  $r_i$  от внутренней стенки вертикального кольцевого аспирационного канала до частицы определяем по формуле

$$r_i = \sqrt{(R_n + x_i)^2 + y_i^2} - R_m \quad (9)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – координаты частицы по осям  $\bar{O}x$  и  $\bar{O}y$  во время  $t_i$ .

Начальными условиями движения частицы при этом являются

$$\begin{cases} x(0) = 0; & y(0) = 0; & z(0) = z_0 + l \cdot \sin \alpha; \\ \dot{x}(0) = \dot{r}_{2k} \cdot \cos \alpha; & \dot{y}(0) = 2\pi \cdot n_p \cdot R_n; & \dot{z}(0) = \dot{r}_{2k} \cdot \sin \alpha, \end{cases} \quad (10)$$

где  $Z_0 = 0,2$  м – координата установки диска распределителя.

Расчеты показывают, что скорость  $\dot{r}_{2k} = \sqrt{\dot{x}_{2k}^2 + \dot{z}_{2k}^2}$  схода частиц с дискового распределителя оказывает существенное влияние на траектории их движения в вертикальном кольцевом аспирационном канале.

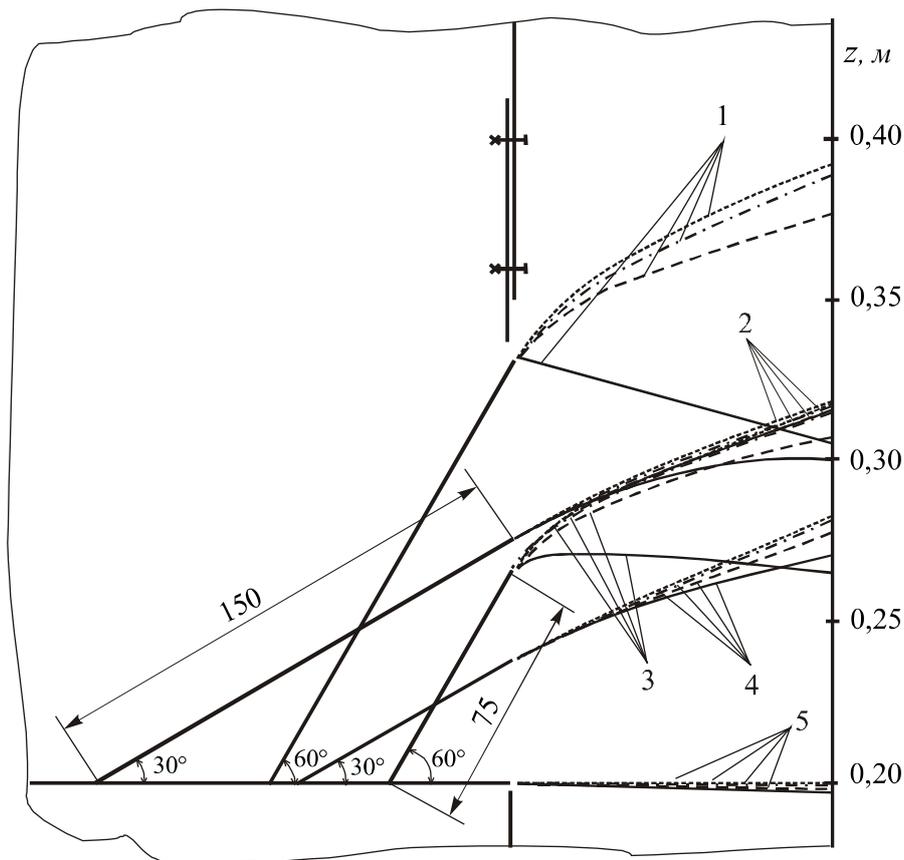


Рис. 2. Траектории движения частицы в вертикальном кольцевом аспирационном канале в зависимости от конструктивных параметров дискового распределителя: 1 – угол наклона секторов  $\alpha = 60^\circ$ , длина  $l = 0,150$  м; 2 –  $\alpha = 30^\circ$ ,  $l = 0,150$  м; 3 –  $\alpha = 60^\circ$ ,  $l = 0,075$  м;  $\alpha = 30^\circ$ ,  $l = 0,075$  м; 5 – при отсутствии секторов; — — — —  $n_p = 100$  мин<sup>-1</sup>; - - - - -  $n_p = 150$  мин<sup>-1</sup>; - · - · -  $n_p = 200$  мин<sup>-1</sup>; ······  $n_p = 250$  мин<sup>-1</sup>

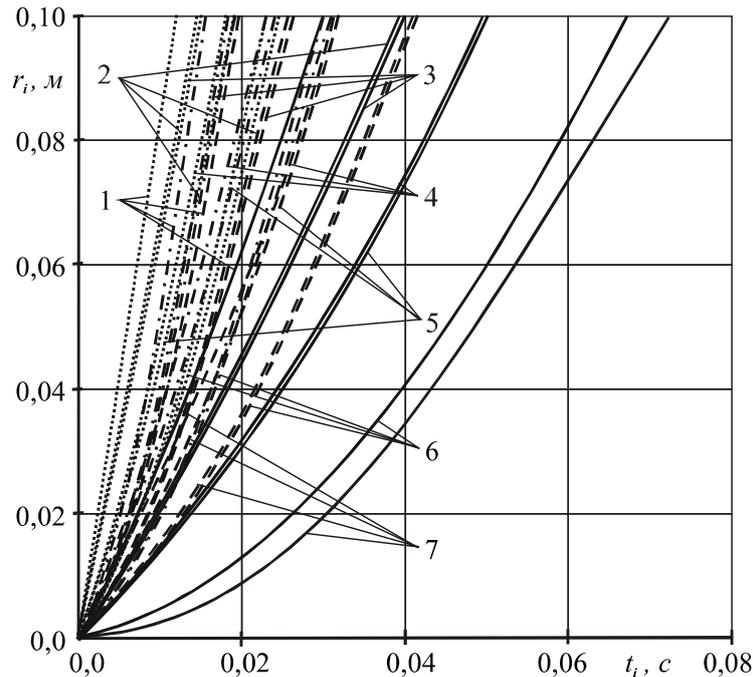


Рис. 3. Зависимости координаты  $r_i$  частицы в вертикальном кольцевом аспирационном канале от времени  $t_i$  и конструктивных параметров дискового распределителя: 1 – при отсутствии наклонных секторов; 2 – угол наклона секторов  $\alpha = 30^\circ$ , их длина  $l = 0,075$  м; 3 –  $\alpha = 30^\circ$ ,  $l = 0,15$  м; 4 –  $\alpha = 45^\circ$ ,  $l = 0,075$  м; 5 –  $\alpha = 45^\circ$ ,  $l = 0,150$  м; 6 –  $\alpha = 60^\circ$ ,  $l = 0,075$  м; 7 –  $\alpha = 60^\circ$ ,  $l = 0,150$  м; — — — — —  $n_p = 100$  мин<sup>-1</sup>; - - - - -  $n_p = 150$  мин<sup>-1</sup>; ······  $n_p = 200$  мин<sup>-1</sup>; ·········  $n_p = 250$  мин<sup>-1</sup>

На рис. 2 приведены траектории движения частиц в кольцевом канале (скорость воздушного потока  $V_B = 7$  м/с) при коэффициенте их трения  $f = 0,3$  и скорости витания  $V_{вит} = 7$  м/с в зависимости от конструктивных параметров дискового распределителя. При увеличении частоты вращения распределителя в изученном интервале  $n_p = 100 \dots 250$  мин<sup>-1</sup> координаты  $z_i$  принимают большие значения в любой момент времени  $t_i$  из-за увеличения составляющей скорости  $\dot{y}_i$ .

Частицы при  $n_p = 100\text{--}250$  мин<sup>-1</sup> после перемещения по распределителю без секторов (только горизонтальный участок) имеют примерно одинаковые траектории движения в аспирационном канале, так как без участка торможения их скорости в момент схода с распределителя являются значительными (составляют соответственно значения  $\dot{x}_{2\kappa} = 2,8\text{--}7,4$  м/с). Поэтому при глубине канала  $h_\kappa = 0,1$  м в момент достижения наружной стенки канала ( $r_\kappa = 0,1$  м) различия координат по вертикали (ось  $Oz$ ) составляют  $\Delta z_\kappa = 0,5\text{--}3,7$  мм. Скорости частицы при достижении наружной стенки и  $n_p = 100\text{--}250$  мин<sup>-1</sup> имеют соответственно значения  $\dot{x}_\kappa = 2,8 \dots 7,3$  м/с,  $\dot{y}_\kappa = 4,1\text{--}10,4$  м/с,  $\dot{z}_\kappa = -0,3\text{--}-0,1$  м/с.

При секторах с углом наклона  $\alpha = 30^\circ$  и различных частотах  $n_p$  вращения распределителя траектории движения частиц также практически не изменяются. При длине сектора  $l = 0,075$  м и  $n_p = 100\text{--}250$  мин<sup>-1</sup> ( $\dot{x}_{2\kappa} = 1,8\text{--}5,1$  м/с) изменения координаты по оси  $Oz$  составляют  $\Delta z_\kappa = 1,4 \dots 8,9$  мм, а скорости частицы у наружной стенки соответственно имеют значения  $\dot{x}_\kappa = 1,8\text{--}5,0$  м/с,  $\dot{y}_\kappa = 4,2\text{--}10,4$  м/с,  $\dot{z}_\kappa = 0,6\text{--}2,7$  м/с. При  $l = 0,150$  м ( $\dot{x}_{2\kappa} = 1,8 \dots 5,4$  м/с) изменения координаты составляют  $\Delta z_\kappa = 1,6\text{--}10,1$  мм, а скорости соответственно —  $\dot{x}_\kappa = 1,8\text{--}5,4$  м/с,  $\dot{y}_\kappa = 4,2\text{--}10,4$  м/с,  $\dot{z}_\kappa = 0,6\text{--}2,9$  м/с.

При угле наклона  $\alpha = 60^\circ$  секторов частота  $n_p$  вращения оказывает значительное влияние на траектории движения частиц. При длине секторов  $l = 0,075$  м и  $n_p = 100\text{--}250$  мин<sup>-1</sup> ( $\dot{x}_{2\kappa} = 0,2\text{--}1,4$  м/с) изменения координаты по оси  $Oz$  составляют  $\Delta z_\kappa = 2,2\text{--}54,4$  мм, скорости соответственно —  $\dot{x}_\kappa = 0,2\text{--}1,4$  м/с,  $\dot{y}_\kappa = 4,2\text{--}10,4$  м/с,  $\dot{z}_\kappa = -0,3\text{--}2,1$  м/с. При  $l = 0,150$  м ( $\dot{x}_{2\kappa} = 0\text{--}1,7$  м/с) изменения координаты по оси  $Oz$  составляют  $\Delta z_\kappa = 5,0\text{--}90,2$  мм), а скорости соответственно —  $\dot{x}_\kappa = 0\text{--}1,6$  м/с,  $\dot{y}_\kappa = 4,2\text{--}10,4$  м/с,  $\dot{z}_\kappa = -0,7\text{--}2,6$  м/с.

На эффективность выделения примесей из зерновой смеси в вертикальном кольце-

вом аспирационном канале также значительное влияние оказывает время  $t_k$  нахождения частицы в зоне сепарации, которое зависит от конструктивных параметров дискового распределителя.

На рис. 3 приведены зависимости координаты  $r_i$  частицы в вертикальном кольцевом аспирационном канале в зависимости от времени  $t_i$  и конструктивных параметров дискового распределителя при скорости витания частицы  $V_{\text{вм}} = 7$  м/с, скорости воздушного потока  $V_B = 7$  м/с и коэффициенте трения частицы о сталь  $f = 0,3$ , которые показывают, что наибольшее время нахождения частицы в зоне сепарации при данных условиях обеспечивается при частоте вращения дискового распределителя  $n = 100$  мин<sup>-1</sup>, угле наклона секторов  $\alpha = 60^\circ$  и их длине  $l = 0,150$  м.

При данных физико-механических свойствах частиц и скорости  $V_B$  воздушного потока наибольшее время  $t_k$  нахождения их в зоне сепарации обеспечивается при частоте вращения  $n_p = 100$  мин<sup>-1</sup>, угле наклона секторов  $\alpha = 60^\circ$  и их длине  $l = 0,150$  м.

Дальнейшие расчеты показывают, что при уменьшении частоты  $n_p$  вращения дискового распределителя время  $t_k$  нахождения частицы в зоне сепарации увеличивается. Наилучшие условия сепарирования зерновой смеси в вертикальном кольцевом аспирационном канале обеспе-

чиваются при малых значениях скоростей схода частиц с дискового распределителя, которые зависят от физико-механических свойств частиц зерновой смеси и конструктивно-технологических параметров распределителя зерна. Наличие секторов дискового распределителя длиной  $l = 0,075$  и  $0,150$  м способствует увеличению времени  $t_k$  нахождения частицы в зоне сепарации, но длина  $l$  оказывает меньшее влияние на  $t_k$  по сравнению с частотой  $n_p$  вращения и углом  $\alpha$  наклона секторов.

Полученные результаты исследований позволяют приблизиться к оптимальным конструктивным параметрам одного из конструктивных элементов пневмосистемы с вертикальным кольцевым аспирационным каналом – дискового распределителя зерна, следовательно, повысить эффективность работы применяемых в зерноочистительно-сушильных комплексах виброцентробежных сепараторов.

После проведения выше описанных исследований на основе серийного сепаратора МЗП-25 была разработана виброцентробежная машина первично-вторичной очистки семян МЗП-25/10, оснащенная пневмосистемой с вертикальным кольцевым аспирационным каналом и дисковым распределителем зерна с наклонными секторами (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Общий вид виброцентробежной машины первично-вторичной очистки МЗП-25/10: а – вид спереди слева; б – вид сзади справа

Машина МЗП-25/10 предназначена для очистки, сортирования семян зерновых, крупяных и бобовых культур от легких, крупных, мелких примесей, щуплого зерна и применяется в составе технологических линий для первичной и вторичной очистки зерна и семян. В семенном режиме ее производительность составляет 10 т/ч (очистка пшеницы влажностью до 16% и содержанием сорной примеси, выделяемой рабочими органами машины, до 3%), а продовольственном – 25 т/ч (очистка зерна пшеницы влажностью до 16% и содержанием сорной примеси до 5%).

Машина МЗП-25/10 имеет корпус, вращающийся внутри него, и совершающий колебания ротор с ситовым барабаном из трех отдельных цилиндрических решет, механизмы очистки решет, загрузочное устройство, вращающийся распределитель зерна, вертикальный кольцевой аспирационный канал, образованный наружной и внутренней стенками. Отвод отработанного воздуха осуществляется из верхней части пневмосистемы.

Разработанная для виброцентробежной машины первично-вторичной очистки семян МЗП-25/10 пневмосистема с кольцевым аспирационным каналом имеет увеличенную зону аспирации в сравнении с серийной и оснащена дисковым распределителем. Параметры последнего оптимизированы после проведенных исследований. Пневмосистема обеспечивает эффективность выделения легких примесей 54,4–70,8% при очистке озимой ржи сорта Вятка 2 с чистотой исходного материала 95,88–98,23%, содержанием семян других растений 760–2880 шт./кг, в том числе семян сорняков – 700–2840 шт./кг, при потерях полноценного зерна в отходы 1,91–2,75% [2].

### Заключение

Технологическая линия, в которой в качестве машины первичной очистки функционирует виброцентробежная машина первично-вторичной очистки семян МЗП-25/10, позволяет получать семена 1 и 2 класса чистоты за один пропуск, кроме случаев, когда для выделения трудноотделимых при-

месей необходимо использовать специальные машины [6, 10, 11].

Разработанная с учетом результатов исследований пневмосистема с вертикальным кольцевым аспирационным каналом успешно применяется в машине первично-вторичной очистки семян МЗП-25/10 в составе зерноочистительно-сушильных комплексов.

### Список литературы

1. Андреев В.Л., Шилин В.В. Актуальность разработки пневмосистемы для виброцентробежного сепаратора / Совершенствование технических средств для механизации сельскохозяйственных процессов: Сб. тр. НИИСХ Северо-Востока. – Киров, 2000. – С. 59–63.
2. Бурков А.И., Андреев В.Л., Шилин В.В. Разработка пневмосистемы для виброцентробежной машины МЗП-25/10 и ее использование при реконструкции семяочистительной линии // Inżynieria Systemow Bioagrotechnicznych: Zeszyt 2–3 (11–12). – Plock, 2003. – P. 147–157.
3. Гурбанов М. Динамика зернового виброцентробежного сепаратора с дифференциальным приводом: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1984. – 159 с.
4. Курбанов Р.Ф. Разработка и обоснование основных параметров фракционного пневмоинерционного сепаратора зернового вороха: дис. ... канд. техн. наук. – Киров, 1995. – 193 с.
5. Пневматический сепаратор: Патент № 2176565 РФ. МПК 7 B07B7/08 / А.И. Бурков, В.Л. Андреев, В.В. Шилин. – № 200114458/03; Заявлено 02.06.2000г. // Открытия. Изобретения. – 2001. – № 34.
6. Разработка и совершенствование малогабаритных пневмосепараторов с замкнутым циклом воздушного потока: Монография / В.Е. Саитов, В.Г. Фарафонов, А.Н. Суворов, Д.В. Григорьев. – Киров: ФГБОУ ВПО «Вятская ГСХА», 2012. – 209 с.
7. Савицкий А.К. Совершенствование процессов в центробежном сепараторе с вращательными колебаниями: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1986. – 163 с.
8. Саитов В.Е. Повышение эффективности функционирования зерноочистительных машин путем совершенствования их основных рабочих органов и пневмосистем с фракционной сепарацией: дис. ... докт. техн. наук. – Киров, 2014. – 519 с.
9. Саитов В.Е., Фарафонов В.Г., Суворов А.Н. Исследование процессов в рабочих органах сепараторов зерна: Монография. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 201 с.
10. Саитов В.Е., Григорьев Д.В. Замкнутый малогабаритный пневматический сепаратор для очистки зерна // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2012. – № 7. – С. 15–18.
11. Сычугов Н.П., Саитов В.Е., Гатауллин Р.Г. Повышение эффективности функционирования семяочистительных машин путем совершенствования рабочих органов пневмосистем: Монография. – Киров: ФГБОУ ВПО «Вятская ГСХА», 2006. – 193 с.
12. Холодилин А.Н. Вибрационное решетное сепарирование зернопродуктов в поле центробежных сил: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1985. – 150 с.