Тип статьи: научная
УДК 631.362.32
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-5-86-95

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ПНЕВМОСЕПАРИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Константин Николаевич Тишанинов
Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Россия
TishaninovKN@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку: Константин Николаевич Тишанинов, TishaninovKN@rambler.ru
Corresponding author: Konstantin Tishaninov, TishaninovKN@rambler.ru

Реферат. *Одним из основных способов разделения зернового вороха является пневмосепарирование на основе различия аэродинамических сопротивлений компонентов зерносмеси воздушному потоку. Дана классификация пневмосепарирующих устройств по следующим параметрам: способ циркуляции воздушного потока, количество сепарирующих каналов, способ использования систем, направление воздушного потока в сепарирующих каналах и камерах, способ подвода воздуха в зону пневмосепарации, кратность обработки, форма пневмосепарирующих каналов, способ подачи зерновой смеси в канал, тип устройств для выделения легких примесей, способ регулирования расхода воздуха в канале. Обобщены разработанные разными авторами формулы для коэффициента сопротивления частицы воздушному потоку. Установлены оптимальные размеры пневмоканала: глубина канала не должна превышать 200 мм, а ширина – 1500 мм. Установлено, что наиболее частая используемая форма пневмоканала - прямоугольная. Показано, что для ввода зернового материала в пневмоканал используются различные устройства: скатные доски, опорные сетки, рифленные валики, разбрасывающие диски, вибрационные, ленточные, пневматические, комбинированные устройства. По направлению воздушного потока различают сепараторы: вертикальные, наклонные, горизонтальные. Установлено, что для очистки воздуха от пыли обычно используют жалюзийные инерционные пылеуловители. Рассмотрены наиболее современные конструкции диаметральных вентиляторов. На основе выполненного анализа даны рекомендации разработчикам аспирационных систем: обеспечивать запас ширины пневмоканала так, чтобы с увеличением подачи зернового материала не уменьшалась эффективность воздушной очистки, но при этом не снижалась равномерность воздушного потока в пневмоканале.*

Ключевые слова: *аспирационная система, пневмоканал, диаметральный вентилятор.*

DESIGNS OF PNEUMATIC SEPARATION SYSTEMS ANALYSIS

Konstantin Tishaninov
ALL-Russian research Institute for the use of machinery and petroleum products in agriculture, Tambov, Russia
TishaninovKN@rambler.ru

Abstract. *One of the main methods of separating a grain heap is pneumatic separation based on the difference in the aerodynamic resistance of the components of the grain mixture to the air flow. A classification of pneumatic separating devices is given according to the following parameters: method of air flow circulation, number of separating channels, method of using systems, direction of air flow in separating channels and chambers, method of supplying air to the pneumatic separation zone, frequency of processing, shape of pneumatic separating channels, method of feeding grain mixture into the channel , type of devices for separating light impurities, method of regulating air flow in the channel. The*

formulas developed by different authors for the coefficient of particle resistance to air flow are generalized. The optimal dimensions of the pneumatic channel have been established: the depth of the channel should not exceed 200 mm, and the width should not exceed 1500 mm. It has been established that the most commonly used shape of the pneumatic channel is rectangular. It is shown that various devices are used to introduce grain material into the pneumatic channel: pitched boards, support nets, corrugated rollers, spreading discs, vibration, belt, pneumatic, and combined devices. According to the direction of the air flow, separators are distinguished: vertical, inclined, horizontal. It has been established that louvered inertial dust collectors are usually used to clean the air from dust. The most modern designs of cross-flow fans are considered. Based on the analysis performed, recommendations were given to developers of aspiration systems: to ensure a margin of pneumatic channel width so that with an increase in the supply of grain material, the efficiency of air cleaning does not decrease, but at the same time the uniformity of the air flow in the pneumatic channel does not decrease.

Keywords: *aspiration system, pneumatic channel, diametral fan.*

Для цитирования: Тишанинов К.Н. Анализ конструкций пневмосепарирующих систем // Наука в Центральной России. 2023. Т. 65, № 5. С. 86-95. https://doi.org/10.35887/2305- 2538-2023-5-86-95.

For citation: Tishaninov K. Designs of pneumatic separation systems analysis. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 65(5): 86-95. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-5-86-95.

Введение. Широко распространенным зерноочистительным машинам типа ЗВС-20А присущ следующий недостаток – ее аспирационная система сильно упрощена и выделяет только пыль. Производителям зерна приходиться дважды пропускать зерновой ворох через очистительную линию, чтобы добиться требуемого качества зерна. Необходимость создания новых зерноочистительных машин обусловлена также требованиями рынка. Для создания новой воздушно-решетной машины необходимо проанализировать современные модели зерно-семяочистительных машин, выявить основные тенденции развития и найти резервы повышения качества их работы. Поэтому анализ конструкций современных пневмосепарирующих систем является актуальным для разработчиков зерноочистительного оборудования.

Результаты и обсуждения. Одним из основных способов разделения зернового вороха является пневмосепарирование - разделение вороха по аэродинамическим свойствам. Преимущества этого способа заключаются в высокой удельной производительности, низком уровне травмирования семян, простоте конструкции рабочих органов, и является дополнением к решетному и триерному способам очистки зерна.

Разделение зернового вороха в пневмосепараторе основано на различие аэродинамических сопротивлений компонентов зерносмеси воздушному потоку. Аэродинамические свойства частиц потока зерна определяются коэффициентом сопротивления k и скоростью витания $v_{\text{в}}$. Скорость витания отдельной частицы можно определить из выражения [1]:

$$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2gm}{k\rho_{\text{в}}S_{\text{м}}}}, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг;

k – коэффициент сопротивления частицы воздушному потоку;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м^3;

$S_{\text{м}}$ – площадь миделева сечения, м^2.

Способность частицы сопротивляться воздушному потоку в общем случае определяется более сложно (зависит от режима движения воздушного потока, отдельных характеристик потока и т.д.), поэтому эту характеристику частицы различные авторы определяли по-разному (Таблица 1, [1]).

Таблица 1 – Коэффициенты аэродинамического сопротивления частицы потока зерна

Автор	Наименование коэффициента	Год публикации	Формула
В.Н. Хитрова	Коэффициент парусности	1912	$k_0 = \frac{F}{G}$ м^2/кг
В. Бреннер	Коэффициент полета	1928	$k_0 = \frac{G}{kF}$ кг/м^2
В.Я. Гиршсон	Коэффициент обтекания	1929	$k_0 = \frac{G}{0{,}124vF}$ кг $\cdot$ c/м^3
К.М. Барков	Коэффициент парусности	1935	$k_0 = \frac{kF\rho g}{G}$ 1/м^2
А.И. Лурье	Летный коэффициент	1937	$k_0 = \frac{kv^2}{G}\frac{\text{м}^2}{c^2 \cdot \text{кг}}$
Н.Н. Ульрих	Коэффициент удельной парусности	1937	$k = \frac{\gamma V}{kF}$ кг/м^2

Для определения оптимальной скорости разделения зерен основной культуры от зерновых и минеральных примесей используют вариационные кривые, которые отражают плотность распределения компонентов зерносмеси по признаку разделения. Состав зернового вороха, поступающего на послеуборочную очистку, нельзя предопределить, но легкие примеси и часть фуражной фракции (мелкого, битого, дробленого зерна) легче зерен основной культуры, и их можно выделить восходящим воздушным потоком (Рисунок 1).

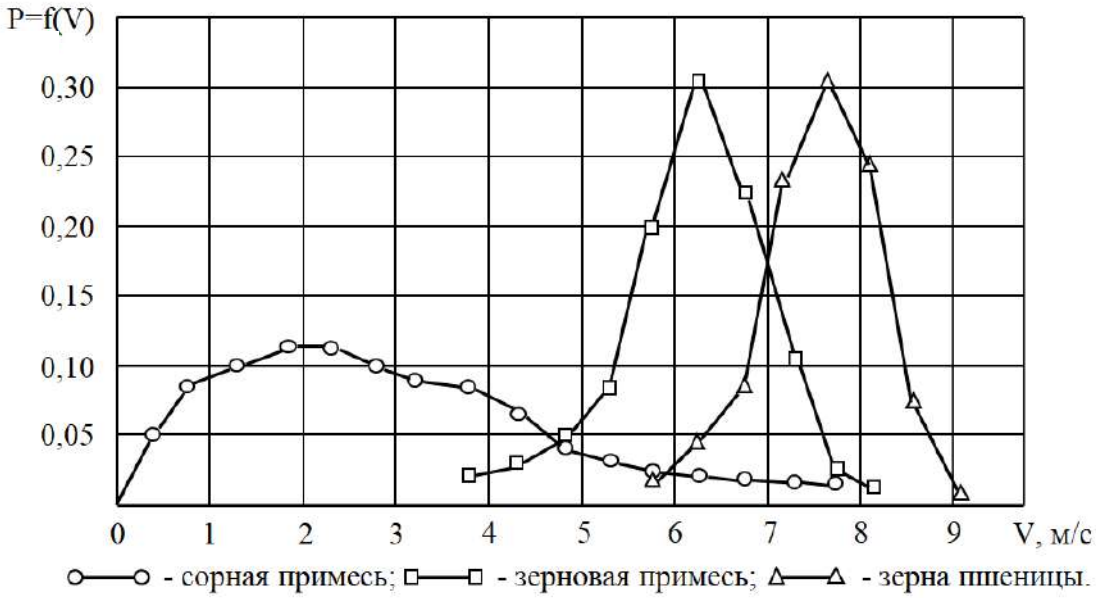


Рисунок 1 – Плотности распределения по скорости витания

Пневмосистемы отличаются по способу циркуляции воздушного потока, количеству сепарирующих каналов, способу использования систем, направлению воздушного потока в сепарирующих каналах и камерах, способу подвода воздуха в зону пневмосепарации, кратности обработки, форме пневмосепарирующих каналов, способу подачи зерновой смеси в канал, типу устройств для выделения легких примесей, способу регулирования расхода воздуха в канале (Таблица 2), и, как правило,-пневосепарирующая система состоит из:

- пневмоканала (одного или нескольких);

- устройства ввода зернового материала;
- устройства вывода примесей и пыли;
- осадочной камеры;
- пылеуловителя;
- вентилятора;
- соединительных элементов.

Таблица 2 – Классификация пневмосепарирующих устройств

Отличительный признак пневмосепарирующего устройства	**Значение признака пневмосепарирующего устройства**
Способ циркуляции воздушного потока	а) с замкнутым циклом воздуха б) с разомкнутым циклом воздуха в) с замкнуто-разомкнутым циклом воздуха
Количество сепарирующих каналов	а) с одним каналом б) с двумя каналами в) многоканальный
Способ использования систем	а) централизованные системы б) самостоятельные системы в) сложные системы (воздушно-решетные системы в зерно- и семяочистительных машинах)
Направление воздушного потока в сепарирующих каналах и камерах	а) вертикальное б) горизонтальное в) наклонное
Способ подвода воздуха в зону пневмосепарации	а) с всасывающим потоком воздуха б) с нагнетательным потоком воздуха в) с нагнетательно-всасываемым потоком воздуха
Кратность обработки	а) однократная б) двухкратная в) многократная
Форма пневмосепарирующих каналов	а) круглая б) кольцевая в) квадратная г) прямоугольная
Способ подачи зерновой смеси в канал	а) вибролотком б) клапаном в) шнековым питателем г) бункерным питателем д) дисковым питателем
Тип устройств для выделения легких примесей	а) осадочные камеры б) жалюзийные пылеуловители в) циклонные пылеуловители
Способ регулирования расхода воздуха в канале	а) дросселирование б) подвод части атмосферного воздуха

Разделение зернового материала воздушным потоком происходит в пнемоканале (его устройство показано на рисунке 2). Пневмоканал характеризуется следующими параметрами: глубиной (D), шириной (B), высотой подачи зернового материала (H_2), высотой канала (H_1), формой, наклоном.

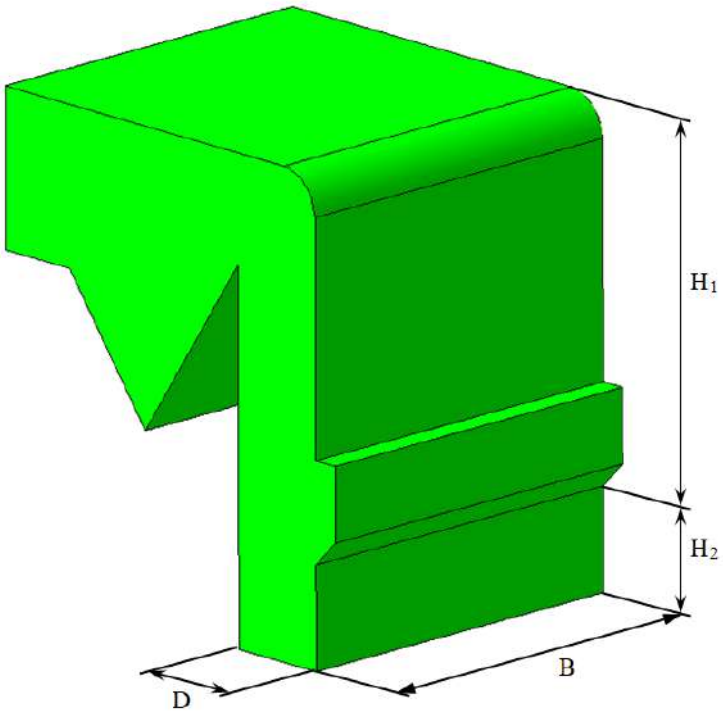
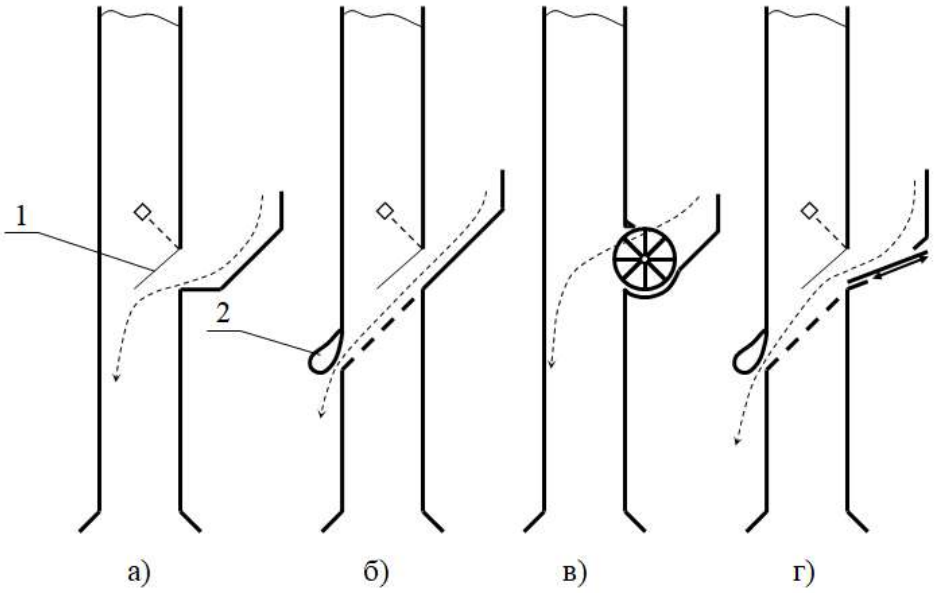


Рисунок 2 – Устройство пневмоканала

По направлению воздушного потока сепараторы различают: вертикальные, наклонные, горизонтальные. Горизонтальные пневмосепараторы обладают низкой четкостью разделения зерносмеси и используются достаточно редко. Эффективность очистки вертикальными и наклонными сепараторами зависит от совокупности факторов, поэтому нет точных рекомендаций по выбору вертикального или наклонного пневмоканала.



1 – клапан; 2 – уплотнительный козырек.
Рисунок 3 – Устройства ввода зерна в пневмоканал

Для ввода зернового материала в пневмоканал используются различные устройства (скатные доски, опорные сетки, рифленные валики, разбрасывающие диски, вибрационные, ленточные, пневматические, комбинированные), которые можно условно разделить на активные и пассивные [4].

Наиболее простой способ ввода зерна в пневмоканал осуществляется скатной доской (Рисунок 3а). Параметры скатной доски (угол наклона, длина, высота падения зерна на скатную доску) определяют скорость ввода зерна в пневмоканал. А.Б. Демский и В.Ф. Веденьев рекомендуют оптимальную скорость ввода зерна – 0,2…0,5 м/с [2]. Несмотря на простоту конструкции, скатные доски не обеспечивают равномерную подачу зерна по ширине канала и их трудно перенастраивать при смене культуры. Поэтому скатные доски зачастую применяют вместе с опорной сеткой (Рисунок 3б).

Опорные сетки позволяют увеличить время сепарации зернового материала в пневмоканале и применяются достаточно широко (ОПС-2, СП-2У-Р). Размер отверстия сетки должен быть таким, чтобы в нем не застревали зерна. Опорная сетка создает дополнительное сопротивление, но при этом помогает выровнить воздушный поток в пневмоканале. Скатные доски и опорная сетка являются пассивными устройствам ввода, к активным относятся питающий валик и вибролоток.

Питающие валики (Рисунок 3в) различаются материалом изготовления (пластмассовые, стальные, щеточные), числом лопаток, формой (цилиндрические, эллипсойдные), направлением подачи (верхней, нижней). Они просты в изготовлении и позволяют задавать начальную скорость ввода зерна в пневмоканал.

Вибролоток (РЗ-БАБ, У1-БСЗ, У1-ППС, ПА-20) позволяет подготовить зерновой материал к подаче так, чтобы легкие примеси в результате самосортирования оказались на поверхности, но из-за низкой начальной скорости ввода зерна в пневмоканал вибролоток должен укомплектовываться опорной сеткой.

Герметичность пневмоканала поддерживают за счет клапанов или уплотнительных козырьков. Клапаны не способны регулировать подачу при изменении нагрузки, поэтому более надежным способом герметизации пневмоканала в местах ввода и вывода зернового материала являются уплотнительные козырьки, рисунок 4.

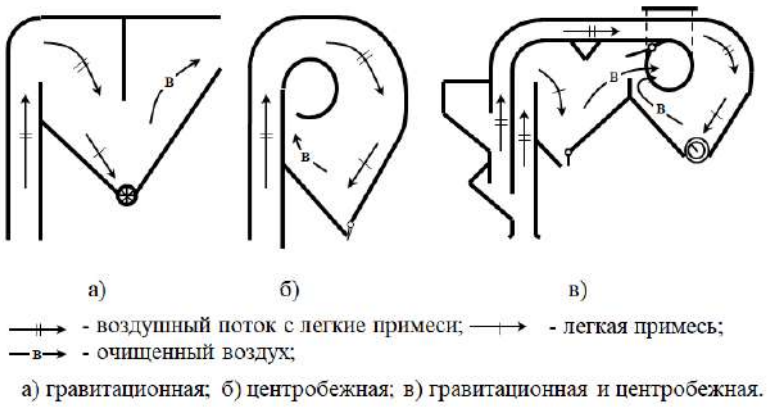
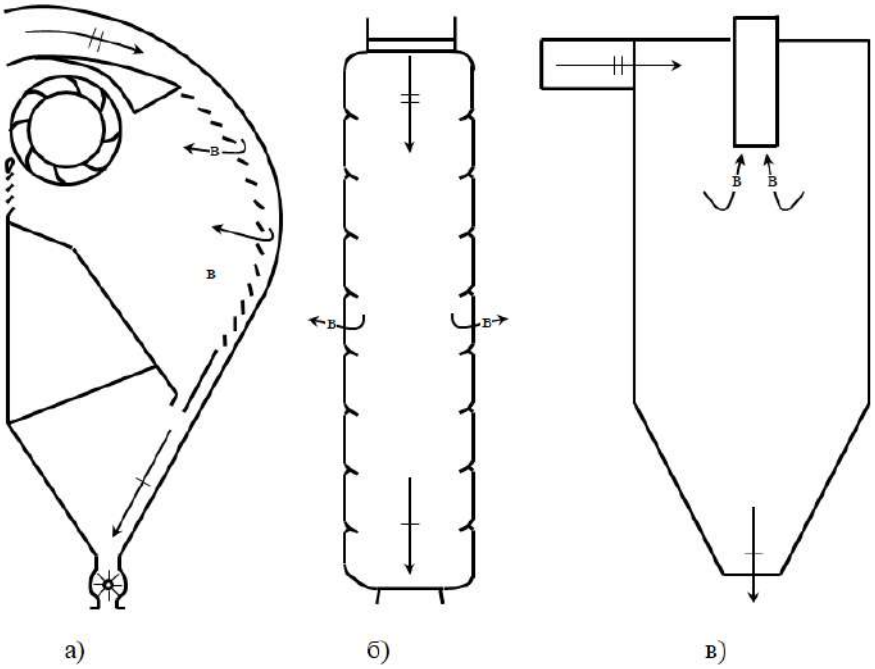


Рисунок 4 – Схемы осадочных камер

После очищения зернового вороха восходящим воздушным потоком в пневмоканале от легких примесей, в дальнейшем необходимо очистить воздушный поток от легких примесей. Для этого используются гравитационные и центробежные осадочные камеры. В осадочной камере скорость воздушного потока уменьшается до 1,0…1,6 м/с, в результате чего под действием гравитационных и центробежных сил легкие примеси выделяются из воздушного потока (Рисунок 4).

Для очистки воздуха от пыли обычно используют жалюзийные инерционные пылеуловители (Рисунок 5а). Они обладают низким аэродинамическим сопротивлением (300…1000 Па) и приемлемым уровнем очистки (70…95%). Конструкция жалюзийных пылеуловителей позволяет

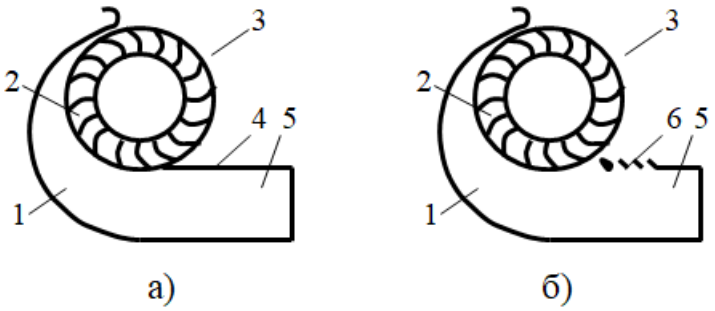
использовать их в замкнутых пневмосистемах. При разомкнутой схеме пневмосистемы обычно используют тканевые или циклонные пылеуловители (Рисунок 5б, 5в). Тканевые фильтры обладают наибольшим уровнем очистки (99…100%), но при этом большим аэродинамическим сопротивлением (1000 Па и более) и высокой трудоемкостью обслуживания. Циклоны применяются ограниченно из-за их высокого аэродинамического сопротивления (1200 Па) при степени очистки (92…97%).



а) инерционный (ПС-15); б) тканевый (СП-2У-Р); в) циклон.

Рисунок 5 – Схемы пылеуловителей

В существующих зерноочистительных агрегатах применяют центробежные и диаметральные вентиляторы. Центробежные вентиляторы имеют более высокий коэффициент полезного действия, но не обеспечивают достаточную равномерность воздушного потока по ширине канала, поэтому более широко используются диаметральные вентиляторы (Рисунок 6), которые создают равномерный плоскопараллельный поток.



1 – корпус; 2 – колесо; 3 – входное отверстие; 4 – смежная стенка; 5 – выходной канал; 6 – жалюзи.

Рисунок 6 – Схемы диаметральных вентиляторов

Для улучшения аэродинамических свойств Н.П. Сычуговым, Н.И. Грабельковским, А.И. Бурковым, Н.В. Жолобовым, В.В. Антюхиным, А.А. Гетхеманом было предложено прямолинейную смежную стенку 4 выполнять в виде жалюзийной решетки 6 (Рисунок 6б). Это позволило уменьшить уровень шума и увеличить диапазон устойчивой работы вентилятора.

Конструкции диаметральных вентиляторов постоянно совершенствуются, и они представлены многими отечественными разработками (Рисунок 7) [13 - 20].

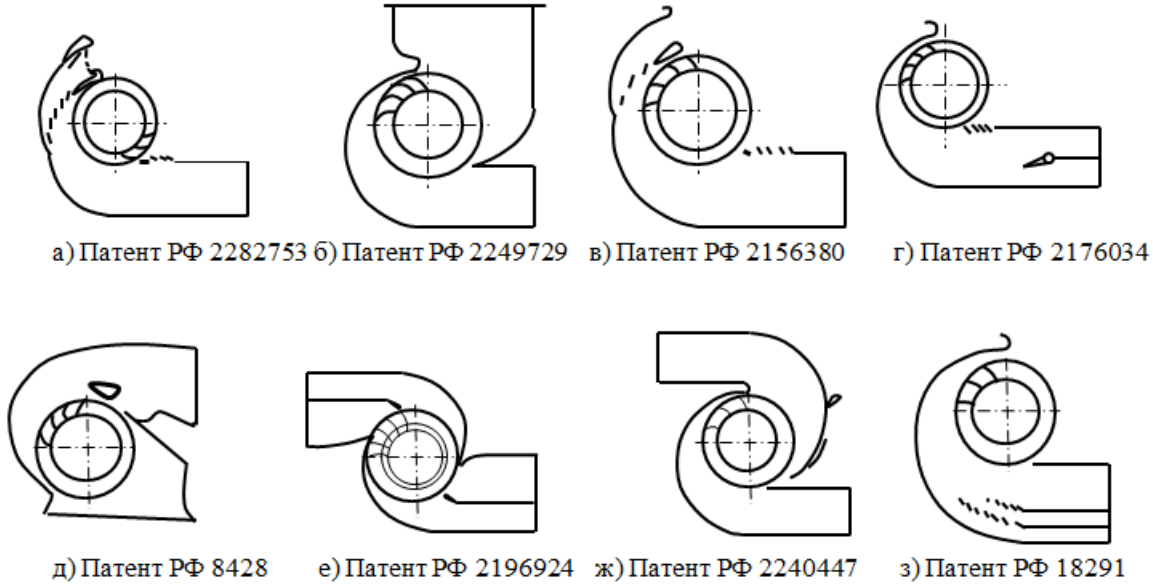


Рисунок 7 – Схемы диаметральных вентиляторов

К недостаткам пневмосепарирующих систем можно отнести малое время сепарации и постоянство размеров пневмоканала, что отрицательно сказывается на эффективности воздушной очистки при увеличении подачи зернового материала в пневмосистему. Поэтому, при проектировании аспирационной системы необходимо обеспечивать запас ширины пневмоканала так, чтобы с увеличением подачи зернового материала не уменьшалась эффективность воздушной очистки, но при этом не снижалась равномерность воздушного потока в пневмоканале.

Выводы. Проведенный анализ пневмосепарирующих систем позволил выявить резервы улучшения аэродинамических показателей зерноочистительных машин, основные тенденции их развития и на основе созданной классификации выбирать эффективные компоновочные решения.

Список источников

1. Тиц З.Л. Машины для послеуборочной поточной обработки семян // Москва, - 1967 г.

2. Конышев Н.Л. Повышение эффективности функционирования замкнутого пневмосепаратора путем совершенствования основных рабочих органов // Дис. канд. техн. наук. Киров, 2000 – 202 с.

3. Матвеев А.С. К выбору формы поперечного сечения пневмосепарирующего канала // Тракторы и сельхозмашины, 1971, №9, с. 26-28.

4. Пашинова Н.В. Совершенствование процесса сепарации зерна в вертикальныхпневмоканалах // Дис. канд. техн. наук. Улан-Удэ, 2013 –142 с.

5. Туров А.К. Пневмосепарация зерна в вертикальном канале с подготовкой в струйном плоскопараллельном потоке // Дис. канд. техн. наук. Новосибирск, 1984 –185 с.

6. Мухачёв В.А. Планирование и обработка результатов эксперимента. Томск, 2007 – 119 с.

7. Гусев В.Г. Теория планирования многофакторных экспериментов // Метод. указания к лаб. работам. – Владим. Гос. ун-т. Владимир, 2007, с.

8. Барков К.М. Основные элементы сепарирования семян воздушным потоком // Труды ВИМ. – М.: ВИМ, 1935. – Т.1.

9. Хамуев В.Г. Обоснование параметров глубокого пневмосепарирующего канала для очистки семян от трудноотделимых примесей // Дис. канд. техн. наук. – М., 2008. – 150 с.

10. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва, 1980.

11. Летошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины. – М; Л., 1955. – 764 с.

12. Корнеев С.В. Интенсификация рабочего процесса зерноочистительной машины предварительной очистки путем фракционирования зернового материала //Дис. канд.техн. наук. Киров, 2002.

13. Саитов В.Е., Гатауллинг Р.Г. / Патент RU № 2282753 C1 Российская Федерация, МПК F04D 17/04. Диаметральный вентилятор // Заявка: 2004135688/06, 06.12.2004. Опубликовано: 27.08.2006 Бюл. № 24.

14. Бурков А.И. / Патент RU № 2249729 C1 Российская Федерация, МПК F 04 D 17/04. Диаметральный вентилятор // Заявка: 2003128572/06, 23.09.2003. Опубликовано: 10.04.2005 Бюл. № 10.

15. Болотов А.К., Саитов В.Е., Гатауллин Р.Г. /Патент RU № 2156380 C1 Российская Федерация, МПК F04D 17/04. Диаметральный вентилятор // Заявка: 99106717/06, 1999.03.29. Опубликовано: 2000.09.20.

16. Сычугов Н.П., Жолобов Н.В., Корнеев С.В. / Патент RU № 2176034 C1 Российская Федерация, МПК F 04 D 17/04. Диаметральный вентилятор // Заявка: 2000106273/06, 2000.03.13. Опубликовано: 2001.11.20.

17. А.Г. Коровкин, В.Б. Кузнецов, И.О. Керстен, А.Ю. Голубев, В.А. Матвеев, В.А. Воробьев / Патент RU №8428 U1 Российская Федерация, МПК F 04 D 17/04. Диаметральный вентилятор // Заявка: 31.07.1997. Опубликовано: 16.11.1998.

18. Сычугов Н.П., Сычугов Ю.В. / Патент RU № 2196924 C1 Российская Федерация, МПК F 04 D 17/04. Диаметральный вентилятор // Заявка: 2001110155/06, 2001.04.13. Опубликовано: 2003.01.20.

19. Саитов В.Е. / Патент RU № 2240447 C1 Российская Федерация, МПК F 04 D 17/04. Прямоточный диаметральный вентилятор // Заявка: 2003103800/06, 2003.02.10. Опубликовано: 2004.11.20.

20. Сычугов Н.П., Саитов В.Е. / Патент RU № 18291 U1 Российская Федерация, МПК F 04 D 17/04. Диаметральный вентилятор-сепаратор // Заявка: 2000131134/20, 2000.12.13. Опубликовано: 2001.06.10.

References

1. Tic Z.L. Machines for post-harvest in-line processing of seeds // Moscow, - 1967

2. Konyshev N.L. Improving the efficiency of functioning of a closed pneumoseparator by improving the main working bodies // Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Kirov, 2000 – 202 p.

3. Matveev A.S. On the choice of the shape of the cross-section of the pneumoseparating channel // Tractors and agricultural machines, 1971, No. 9, pp. 26-28.

4. Pashinova N.V. Improving the process of grain separation in vertical pneumatic channels // Dis. Candidate of Technical Sciences.Ulan-Ude, 2013 -142 p.

5. Turov A.K. Pneumoseparation of grain in a vertical channel with preparation in a jet plane-parallel flow // Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Novosibirsk, 1984 -185 p.

6. Mukhachev V.A. Planning and processing of experimental results. Tomsk, 2007 – 119 p.

7. Gusev V.G. Theory of planning multifactorial experiments // Method. instructions to the lab. works. – Vladim. Gos. un-T. Vladimir, 2007, p

. 8. Barkov K.M. Basic elements of separation of seeds by air flow // Proceedings of VIM. – M.: VIM, 1935. – T.1.

9. Khamuev V.G. Substantiation of parameters of a deep pneumoseparating channel for cleaning seeds from difficult–to-separate impurities // Dis. candidate of Technical Sciences. - M., 2008. – 150 p.

10. Gortinsky V.V., Demsky A.B., Boriskin M.A. Separation processes at grain processing enterprises. Moscow, 1980.

11. Letoshnev M.N. Agricultural machines. – M; L., 1955. – 764 p.

12. Korneev S.V. Intensification of the working process of a grain cleaning machine of preliminary cleaning by fractionation of grain material //Dis. Candidate of Technical Sciences. Kirov, 2002.

13. Saitov V.E., Gataulling R.G. / Patent RU No. 2282753 C1 Russian Federation, IPC F04D 17/04. Diametral fan // Application: 2004135688/06, 06.12.2004. Published: 27.08.2006 Byul. No. 24.

14. Burkov A.I. / Patent RU No. 2249729 C1 Russian Federation, IPC F 04 D 17/04. Diametral fan // Application: 2003128572/06, 09/23/2003. Published: 10.04.2005 Byul. No. 10.

15. Bolotov A.K., Saitov V.E., Gataullin R.G. /Patent RU No. 2156380 C1 Russian Federation, IPC F04D 17/04. Diametral fan // Application: 99106717/06, 1999.03.29. Published: 2000.09.20.

16. Sychugov N.P., Zholobov N.V., Korneev S.V. / Patent RU No. 2176034 C1 Russian Federation, IPC F 04 D 17/04. Diametral fan // Application: 2000106273/06, 2000.03.13. Published: 2001.11.20.

17. A.G. Korovkin, V.B. Kuznetsov, I.O. Kersten, A.Y. Golubev, V.A. Matveev, V.A. Vorobyev / Patent RU No.8428 U1 Russian Federation, IPC F 04 D 17/04. Diametral fan // Application: 31.07.1997. Published: 16.11.1998.

18. Sychugov N.P., Sychugov Yu.V. / Patent RU No. 2196924 C1 Russian Federation, IPC F 04 D 17/04. Diametral fan // Application: 2001110155/06, 2001.04.13. Published: 2003.01.20.

19. Saitov V.E. / Patent RU No. 2240447 C1 Russian Federation, IPC F 04 D 17/04. Direct-flow diametral fan // Application: 2003103800/06, 2003.02.10. Published: 2004.11.20.

20. Sychugov N.P., Saitov V.E. / Patent RU No. 18291 U1 Russian Federation, IPC F 04 D 17/04. Diametral fan separator // Application: 2000131134/20, 2000.12.13. Published: 2001.06.10.

Информация об авторах

К. Н. Тишанинов – кандидат технических наук.

Information about the authors

K. Tishaninov – Candidate of Technical Sciences.

Поступила в редакцию (Received): 17.09.2023 Принята к публикации (Accepted): 24.10.2023